Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Российская академия наук
Администрация Главы Республики Башкортостан
Академия наук Республики Башкортостан
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
Башкирский государственный университет
Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

*При поддержке*
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-20068)
Правительства Республики Башкортостан
Фонда поддержки и развития науки РБ

# XII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

**Уфа, Республика Башкортостан, Россия**

**19-24 августа 2019 г.**

# АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

**Уфа**
**РИЦ БашГУ**
**2019**

УДК 531/534
ББК 22.2
Д23

**XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики**

Д23 **Аннотации докладов.** 19-24 августа 2019 г., г. Уфа / отв. ред. д-р физ.-мат. наук А.А. Назаров. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2019.—356 с.

ISBN 978-5-7477-4920-7

В сборнике представлены последние достижения в области теоретической и прикладной механики. Приведены результаты применения методов механики в исследовании широчайшего круга явлений, начиная от движения микрочастиц и заканчивая процессами галактического масштаба, включая всевозможные процессы в газах, жидкостях и твердых телах. Отражено эффективное использование методов и результатов фундаментальной механики в междисциплинарных исследованиях, в машиностроении, энергетике, авиации, космонавтике, других отраслях промышленности.

УДК 531/534
ББК 22.2

ISBN 978-5-7477-4920-7

© БашГУ, 2019
© ИПСМ РАН, 2019

## ОРГКОМИТЕТ

И.Г. Горячева – председатель
Р.Р. Мулюков, В.А. Полянский – заместители председателя
Р.М. Имаев, Ю.А. Баимова, А.Н. Богданов – ученые секретари
Б.Д. Аннин, Р.Р. Ахунов, В.А. Бабешко, Р.Н. Бахтизин, А.К. Беляев, В.В. Васильев, Р.Ф. Ганиев, А.С. Гаязов, Д.А. Губайдуллин, В.С. Жернаков, В.Ф. Журавлев, Л.А. Игумнов, В.И. Карев, Д.М. Климов, В.В. Козлов, Н.К. Криони, А.Г. Куликовский, В.А. Левин, А.М. Липанов, И.И. Липатов, Г.А. Любимов, В.П Матвеенко, Г.К. Михайлов, Н.Д. Морозкин, Н.Ф. Морозов, А.А. Назаров, Р.И. Нигматулин, А.К. Ребров, С.Т. Сагитов, С.Я. Степанов, С.Т. Суржиков, В.М. Титов, В.М. Фомин, В.Е. Фортов, Ф.Л. Черноусько

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

И.Г. Горячева (председатель), А.А. Назаров (зам. председателя), А.Н. Абрамов, С.М. Айзикович, И.М. Ананьевский, Б.Д. Аннин, А.А. Афанасьев, А.М. Ахтямов, В.А. Бабешко, В.А. Байков, Д.В. Баландин, Н.В. Баничук, А.К. Беляев, Н.Н. Болотник, Т.В. Бордовицина, А.М. Брагов, В.Н. Бранец, Г.Т. Булгакова, А.А. Буренин, А.О. Ватульян, В.В. Веденеев, О.И. Виноградова, А.Е. Волков, Д.В. Георгиевский, В.В. Голуб, Д.А. Губайдуллин, О.В. Даринцев, С.В. Дмитриев, И.В. Егоров, В.И. Ерофеев. М.А. Ильгамов, Д.А. Индейцев, В.В. Калинчук, Г.И. Канель, А.В. Карапетян, В.И. Карев, Ю.С. Качанов, Д.М. Климов, Л.А. Ковалева, В.В. Козлов, Л.Ю. Коссович, А.Н. Крайко, А.М. Кривцов, А.П. Курячий, В.А. Левин, И.И. Липатов, Д.С. Лисовенко, Е.В. Ломакин, С.А. Лурье, Г.А. Любимов, Т.П. Любимова, А.П. Маркеев, В.В. Марков, В.П. Матвеенко, Ю.Ю. Маховская, О.Э. Мельник, А.Д. Мижидон, А.А. Мовчан, Н.Ф. Морозов, О.Б. Наймарк, Р.И. Нигматулин, Н.В. Никитин, М.А. Новиков, Ю.И. Няшин, М.Ю. Овчинников, А.Н. Осипцов, В.Е. Павловский, В.Н. Паймушин, Г.Я. Пановко, В.П. Пархоменко, Ю.В. Петров, О.А. Плехов, В.А. Полянский, В.В. Пухначев, В.П. Радченко, С.А. Решмин, А.А. Роговой, Э.Е. Сон, А.Л. Стасенко, С.Я. Степанов, Д.В. Тарлаковский, П.В. Трусов, С.Ф. Урманчеев, В.М. Фомин, А.Б. Фрейдин, П.Г. Фрик, С.В. Хабиров, А.К. Цатурян, Ф.Л. Черноусько, В.Ш. Шагапов, В.Ю. Шолом, Е.И. Шифрин, В.Н. Шлянников, Л.Ш. Шустер

### Локальный комитет

А.А. Назаров, Г.К. Агеев, М.Н. Галимзянов, В.С. Жернаков, В.П. Захаров, Р.А. Исмаков, И.В. Кудинов (сопредседатели), В.М. Валитова (руководитель секретариата), В.Р. Акбашев, В.Г. Афанасенко, А.Х. Ахунова, З.Ф. Бакирова, А.Х. Валеева, Р.Р. Ильясов, А.М. Исмагилов, О.Ю. Камкова, Е.С. Карпинская, Л.Р. Кожевникова, Д.В. Кондратьев, Е.А. Корзникова, К.А. Крылова, Л.Д. Матвеева, Н.С. Минасова, Р.Т. Мурзаев, Т.М. Мустакимов, А.А. Мухаметгалина, Л.Х. Рысаева, Р.Ф. Салимьянов, А.А. Саркеева, А.Р. Сафиуллин, Е.В. Соболев, Р.Р. Тляшева, Р.Ф. Фазлыахметов

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

### ТЕОРИИ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР, В ТОМ ЧИСЛЕ СЭНДВИЧЕЙ

**Х. Альтенбах, М. Асмус**

*Университет Магдебурга им. Отто фон Герике, Магдебург, Германия*

holm.altenbach@ovgu.de

Фотоэлектрические преобразователи представляют собой многослойные структуры. Простейшая модель таких структур основана на предположении, что они состоят из двух толстых и жестких внешних пластинок, между которым заключена очень тонкая и мягкая прослойка. Будет показано, что использование теории эквивалентного слоя дает неудовлетворительные результаты расчетов слоистых структур по сравнению с экспериментами. Будет представлена теория, основанная на отдельном описании каждого слоя. Приведены некоторые результаты моделирования, которые демонстрируют лучшее согласие с экспериментами.

### МЕХАНИКА В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ: КАК СДЕЛАТЬ ТЕХНОЛОГИЮ ЛУЧШЕ?

**И.Ш. Ахатов**

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

i.akhatov@skoltech.ru

Для повышения качества и надежности деталей и конструкций, сокращения времени изготовления изделий в промышленности используются высокие технологии. По существу, применение передовых производственных технологий является драйвером индустрии в сторону низкого энергопотребления, миниатюризации, высокой точности и мультифункциональности. Доклад состоит из двух частей. В первой части дается информация о Сколковском институте науки и технологий (Сколтех) и Центре проектирования, производственных технологий и материалов (CDMM). Будут вкратце охарактеризованы ключевые направления исследований и образования: композитные материалы и структуры (изготовление композитов, механические испытания и аттестация, моделирование); аддитивное производство (3D печать, термическое напыление); цифровое проектирование (жизненный цикл изделий, цифровое предприятие Siemens PLM); микро- и наномеханика. Во второй части рассмотрены несколько проблем механики применительно к передовым производственным технологиям: напыление аэрозольной пушкой (Aerosol Beam Direct-Write), капиллярная печать (Capillary-Based Printing), RTM-формование (Resin Transfer Molding), акустическая манипуляция пузырьками в жидкости, графеновые нанопузырьки.

### ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В МЕДИЦИНЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СУСТАВОВ

**А.Г. Баиндурашвили**

*Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И.Турнера, С.-Петербург*

turner01@mail.ru

Представлены статистические данные детей с повреждениями опорно-двигательной системы и ортопедическими заболеваниями в регионах Российской Федерации. Проведен анализ причин и факторов, влияющий на данные показатели. Представлены результаты лечения детей с обширными и критическими глубокими ожогами с применением клеточных технологий. Отражен алгоритм оказания помощи и тактика хирургического лечения детей с тяжелыми переломами позвоночника и повреждением спинного мозга в структуре комплексного лечения с использованием неинвазивной стимуляции спинного мозга. Представлены результаты лечения детей с повреждениями опорно-двигательной системы с применением микрохирургических технологий. Отражены отдаленные результаты оперативного лечения детей с заболеваниями тазобедренного сустава, патологией стопы и нижних конечностей, кисти и верхних конечностей, деформациями и заболеваниями позвоночника, поражениями скелета на фоне артрогрипоза и ДЦП, нейроортопедическими проблемами.

### ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ В АВИАЦИОННОМ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

**А.А. Иноземцев**

*АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь*

office@avid.ru

Рассмотрены задачи механики в области газовой динамики (CFD), тепломассообмена, горения и прочности, успешно решенные при создании авиационного двигателя пятого поколения ПД-14 для магистрального самолета МС-21. Примерами наиболее сложных проблем являются обеспечение непробиваемости корпуса вентилятора, обеспечение стойкости лопаток к попаданию посторонних предметов, сопряжённое аэродинамическое и тепловое моделирование, исследование механических свойств конструкционных материалов и др. В докладе также дан обзор прикладных научных задач авиадвигателестроения на ближайшую перспективу, связанных с созданием семейства авиационных двигателей большой тяги в диапазоне 25…50 тс, и дальнесрочную перспективу.

## МНОГОМЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ С ДЕТОНАЦИЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

**В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков**

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

v.a.levin@mail.ru

Представлены результаты теоретического исследования проблем инициирования, распространения, стабилизации и многомерной структуры газовой детонации. Численно рассмотрены задачи о формировании двумерной и трехмерной ячеистой детонации, спина и его устойчивости при переходе в канал большего или меньшего диаметра. Изучен процесс инициирования детонации без объемного подвода энергии извне, а лишь за счет кинетической энергии сверхзвукового потока горючей смеси или ее взаимодействия с непроницаемыми стенками. Для ряда конкретных конфигураций области течения получены условия возникновения самоподдерживающейся детонации. Исследованы течения с вращающейся волной детонации в камерах сгорания двух типов. Приведены данные по процессам, в которых в качестве горючей смеси используется смесь пропана или метана с окислителем. Расчеты проводятся на оригинальном отечественном вычислительном комплексе с современным интерфейсом, фактически являющемся виртуальной экспериментальной установкой, в которой могут быть реализованы математические модели и вычислительные алгоритмы различной степени сложности.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.) и грантами РФФИ (№ 16-29-01092 и № 18-01-00883).

## ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БАФТИНГА

**А.М. Липанов [1], И.И. Липатов[2], С.А. Карсканов [3]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*

[3]*Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск*

igor_lipatov@mail.ru

Численно исследуется явление возникновения скоростного бафтинга при обтекании профиля NACA0012 трансзвуковым потоком. Предлагается математическая модель, основанная на алгоритмах высокого порядка аппроксимации, позволяющая рассчитывать нестационарные отрывные течения. Модель базируется на интегрировании квазигидродинамических уравнений. Проводится параметрическое исследование обтекания профиля высокоскоростным потоком вязкого газа в зависимости от угла атаки. Анализируются как мгновенные, так и осредненные картины течения. Получены распределения пульсационных характеристик течений при различных углах атаки. Выявляются закономерности возникновения отрыва пограничного слоя, определено влияние скачков уплотнения на характер течения вблизи поверхности профиля. Определяется критический угол атаки, при котором начинает иметь место скоростной бафтинг.

## СТРАТИФИЦИРОВАННЫЕ ТЕЧЕНИЯ И ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ГЛУБОКОВОДНЫХ КАНЬОНАХ АТЛАНТИКИ

**Н.И. Макаренко[1,2], Ж.Л. Мальцева[1,2], Е.Г. Морозов[3], Р.Ю. Тараканов[3]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*

makarenko@hydro.nsc.ru

Доклад посвящен обзору результатов совместных исследований, проводившихся учеными Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. В 2009-2018 гг. выполнена большая серия натурных измерений на научно-исследовательских судах «Академик Иоффе» и «Академик Сергей Вавилов» в группе разломов Срединно-Атлантического хребта. Эти разломы являются естественными каналами, обеспечивающими перенос глубинных холодных вод антарктического происхождения из западной Атлантики в восточные бассейны океана. Внутренние волны играют важную роль в таких течениях, поскольку их обрушение способствует интенсификации перемешивания придонных слоев (на глубинах до 5000 м) с менее холодными вышерасположенными слоями. Для описания волновых процессов в придонных течениях разработаны новые математические модели нелинейных длинных волн с дисперсией, учитывающие аномально слабую стратификацию морской воды в глубоководных условиях. Согласно данным моделям волновые режимы реализуются вблизи границы зоны сдвиговой неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, что объясняет механизм образования экстремально длинных вихревых серий в придонных расслоенных течениях, наблюдавшихся в экспедиционных исследованиях.

## ИССЛЕДОВАНИЯ УЧЁНЫХ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН В ОБЛАСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

**Р.Р. Мулюков**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки*
*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
*radik@imsp.ru*

Сделан обзор результатов исследований ученых-механиков Республики Башкортостан в области теоретической и прикладной механики. Рассмотрены достижения в области газо- и гидродинамики, в том числе модели течения газов в газоперекачивающих агрегатах и жидкостей в трубопроводах. Традиционно большое внимание в исследованиях уделяется проблемам разработки газовых и нефтяных месторождений, транспортировки углеводородов. На высоком мировом уровне работает Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем БашГУ. Решаются фундаментальные задачи механики деформируемых тел, в том числе механики разрушения, оценки трещиностойкости элементов конструкций, геометрически нелинейных задач теории оболочек, моделирования технологических процессов. Важным достижением в физике и механике материалов является разработка деформационных методов наноструктурирования материалов, в настоящее время получивших всемирное признание и применение.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

**В.Е. Фортов**

*Российская академия наук, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*
fortov@ras.ru

Свойства сильно сжатого и разогретого вещества при экстремально высоких давлениях и температурах является научной основой новых энергетических, ядерных технологий, оборонных и космических приложений. Эти знания формируют наши базисные мировоззренческие представления о структуре и эволюции Вселенной. В докладе проанализированы экспериментальные методы генерации и диагностики экстремальных состояний вещества, основанные на подходах и методах современной механики. Речь идет о сжатии и необратимом разогреве исследуемого вещества во фронте мощных ударных волн и волн разгрузки Римана, генерируемых высокоскоростным ударом, волнами детонации, химическими ВВ, мощным лазерным, рентгеновским и корпускулярным излучением, а также другими методами. Диагностика возникающих состояний вещества с ультравысокими концентрациями энергии основана на решении «обратной» задачи механики, позволяющем осуществить термодинамические измерения на основе высокоскоростной регистрации кинематических параметров ударных волн, а также волн адиабатического расширения и сжатия. Обсуждаются современные термодинамические, механические, полуэмпирические и компьютерные модели твердого тела и сильно сжатой плазмы в области экстремальных давлений и температур, а также ультравысоких скоростей деформирования и разрушения.

## ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**М.М. Хасанов**

*ООО «Газпромнефть НТЦ», С.-Петербург*
Khasanov.MM@gazpromneft-ntc.ru

В докладе рассмотрен ряд задач теоретической и прикладной механики, возникающих на этапах разведки и эксплуатации газовых и нефтяных месторождений. Одной из них является задача возникновения и роста гидравлических трещин в зависимости от напряженно-деформируемого состояния пласта и технологических параметров закачки жидкости. Также в докладе показана задача комплексного моделирования процессов разрушения слабосцементированных пород в прискважинной зоне и дальнейший транспорт твердых частиц по скважине. Рассмотрен метод полноволнового моделирования процесса распространения сейсмических волн в геологических средах. Возможность его применения для высокоточного описания геометрии слоистых сред и необходимости использования высокопроизводительных вычислительных систем для построения моделей реалистичного масштаба. Отмечено, что в всех рассмотренных примерах есть большое количество нерешенных задач и их эффективное решение возможно при взаимодействии отраслевого и научного сообществ.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СКЛОНОВЫХ ПОТОКОВ

**М.Э. Эглит[1], А.Е. Якубенко[2]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*
[2]*Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
*m.eglit@mail.ru*

В докладе обсуждаются проблемы математического моделированиясклоновых потоков, таких как снежные лавины, сели, оползни, потоки лавы, а также подводные потоки, несущие твердый материал и возникающие на дне морей. Представленыматематические моделидвух типов, отличающиеся уровнем сложности и детализации описания процессов, которые разрабатывались исследователями Московского университета, в частности, авторами доклада. Приведены примеры использования математических моделей для построения аналитических решений, расчета конкретных потоков, исследования влияния реологических свойств движущейся среды, захвата склонового материала и турбулентности.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-01-00361, 17-08-0115.

## СЕКЦИЯ 1. ОБЩАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

### ДИНАМИКА И УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ СПУТНИКОМ ПРИ БУКСИРОВКЕ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПОСРЕДСТВОМ СИЛ КУЛОНА

**В.С. Асланов**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара*

aslanov_vs@mail.ru

Доклад посвящен проблеме активного удаления крупного космического мусора. Рассмотрен бесконтактный метод воздействия активным спутником на нефункционирующий космический объект посредством электростатического взаимодействия. Основными преимуществами этого метода являются возможность удаления космического мусора на геосинхронной орбите при низких энергозатратах и отсутствие опасного и сложного этапа захвата космического мусора. Обсуждаются преимущества использования мультисферного метода Шауба для моделирования и анализа пространственного движения космического мусора. Рассмотрены две схемы буксировки (толкать или тянуть) и показаны преимущества первой схемы. Показаны особенности динамики относительного движения космического мусора под действием кулоновых сил и предложен закон управления электрическим зарядом, позволяющим обеспечить устойчивое относительно центра масс движение космического мусора. Выявлены особенности движения буксируемого объекта, в том числе хаотические явления, вызванные колебаниями упругих элементов. В заключении работы обсуждаются возможности увода неработающих геостационарных спутников сложной конфигурации с использованием электростатического буксира.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00215-а.

### ОБ ОРБИТАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В ДИНАМИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Б.С. Бардин[1,2]**

[1]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

[2]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

bsbardin@yandex.ru

Рассматривается задача об орбитальной устойчивости маятниковых периодических движений тяжелого твердого тела с одной неподвижной точкой. Методика исследования основана на применении методов нормальных форм, КАМ-теории и общей теории устойчивости.Дается изложение результатов исследования задачи в случаях С.Ковалевской, Горячева-Чаплыгина, Бобылева-Стеклова, Гесса, а также в случае динамически симметричного твердого тела. Установлено, что в случаях Горячева-Чаплыгина и Гесса имеет место вырождение (трансцендентный случай). Предложен метод строгого исследования орбитальной устойчивости в указанном случае.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00123.

### УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ, ПЕРИОДИЧЕСКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Е.С. Брискин[1,2], Я.В. Калинин[1,2], Н.Г. Шаронов[1,2]**

[1]*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

[2]*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Иннополис*

dtm@vstu.ru

Проанализированы особенности динамики управляемого движения шагающих роботов «Восьминог» и «Ортоног». Рассмотрены роботы с «шагающеподобными» типами движителей и поставлены задачи развития теории их управляемого движения. Предложены решения некоторых задач, улучающих качество движения таких роботов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10069.

### НОВЕЙШИЕ МЕТОДЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

**А.Д. Брюно**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

abruno@keldysh.ru

В связи со 120-летием выхода последнего тома книги А. Пуанкаре «Новые методы небесной механики» рассматриваются следующие методы, возникшие с тех пор.

1. Метод нормальной формы, позволяющий изучать регулярные возмущения вблизи стационарного решения, вблизи периодического решения.
2. Метод укороченных систем, полученных с помощью многогранников Ньютона, позволяющий изучать сингулярные возмущения.
3. Метод порождающих семейств периодических решений (регулярных и сингулярных).
4. Метод обобщённых задач, допускающих тела с отрицательными массами.
5. Вычисление сети семейств периодических решений как «скелета» части фазового пространства.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00422а.

## СПЕЦИФИКА РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ РОБОТОВ

**О.В. Даринцев**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

*Институт механики им. Р.Р.Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

oleg_sam@mail.ru

Рассмотрены проблема выполнения микроманипуляционных операций, основные эффекты, действующие в зоне контакта деталей и схвата, а также особенности реализации операций захвата объектов с размерами менее 1 мм. Приведена классификация микрозахватных устройств роботов и автоматических станций, используемых при сборке микросистем или планируемых к использованию. Особое внимание уделено специфическим приемам конструирования микрозахватов, оригинальным техническим и технологическим приемам.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН I.29П «Актуальные проблемы робототехники» и в рамках госзадания № 0246-2018-007.

## ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ПО УПРУГИМ НАПРАВЛЯЮЩИМ

**В.И. Ерофеев [1], С.И. Герасимов[1,2], Е.Е. Лисенкова[1,3]**

[1]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

[2]*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров*

[3]*Нижегородский институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Нижний Новгород*

erof.vi@yandex.ru

На примере упругого стержня, совершающего изгибные и изгибно-крутильные колебания, изучаются вибрации рельсовой направляющей, несущей высокоскоростную движущуюся нагрузку. Исследована устойчивость движения высокоскоростных объектов, определены резонансоопасные гармоники упругой направляющей. Исследовано излучение волн движущимся источником, найдены условия на параметры объекта и источника, при которых сопротивление движению будет минимальным. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по деформации рельсовых направляющих ракетного трека, подтверждающее правильность принятой математической модели.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-08-01096, № 18-29-10073.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТОРМОЖЕНИЯ ЦИЛИНДРА С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ УПРУГИХ И ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ

**А.А. Зобова[1], И.Г. Горячева [2]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва*

azobova@mech.math.msu.su

Проведено численно-аналитическое исследование двух задач о движении бесконечного цилиндра, ось которого горизонтальна, по неподвижной горизонтальной плоскости. Распределение контактных давлений, размер области контактного взаимодействия и зависимость силы сопротивления от скорости оси цилиндра определяются из решений квазистатических задач теории упругости и вязкоупругости: качение с проскальзыванием упругого цилиндра по полупространству из того же материала; скольжение жесткого цилиндра по поверхности вязкоупругого полупространства.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00140 и в рамках Госзадания (АААА-А17- 117021310379-5).

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКРО- И МИКРОГИДРОДИНАМИКИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПРИРОДНЫХ ПЛАСТАХ

**В.В. Кузнецов**

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

vladkuz@itp.nsc.ru

Представлены теоретические и экспериментальные результаты в области нестационарной фильтрации несмешивающихся жидкостейв однородных и неоднородных пористых средах, предложеныновые подходы, учитывающие взаимосвязь макро- и микрогидродинамики при течениинефтеводородных жидкостейи воды.Рассмотрены физические процессы, определяющие формирование и подвижность остаточной нефти, определены условия ее эффективного извлечения. Определен механизм вытеснения вязкой нефти водой с образованием языков в природных пластах и определены условия подавления их роста.

Работа выполнена за счет гранта РНФ № 16-19-10519 (первый раздел) и в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А18-118112790037-0).

## ТЕОРИЯ СКРЫТЫХ КОЛЕБАНИЙ И УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**Н.В. Кузнецов**[1,2]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

[2]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

n.v.kuznetsov@spbu.ru

Теория скрытых колебаний, является современным этапом развития теории колебаний А.А. Андронова. Она отразила не только трудности продвижения в решении ряда известных научныхпроблем, но и оказалась востребованной во многих актуальных прикладных задачах. Разработанные методы анализа скрытых колебаний позволили определить границы устойчивостии обнаружить скрытые колебания в различных системах управления, механических и физических моделях.

Работа выполнена при поддержке гранта Ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2858.2018.1.

## ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ОДНОГО КЛАССА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**А.Д. Мижидон**[1,2]

[1]*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ*

[2]*Бурятский государственный университет, Улан-Удэ*

miarsdu@mail.ru

Для исследования систем твердых тел, прикрепленных с помощью пружин кстержню, предлагаются обобщенные математические модели в виде линейных гибридных систем дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от дельта-функций Дирака. В качестве теоретических основ исследованиясобственных колебаний обсуждаются аналитико-численные методы исследования, основанные на математическом аппарате обобщённых функций. Сравнительный анализ численных расчетов предложеннымиметодами с расчетами проведенными другими способами, известными из литературы, показывает достоверность и универсальность предлагаемого подхода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-030004р_а.

## МАШИНА ДУБИНСА: ТРЕХМЕРНОЕ МНОЖЕСТВО ДОСТИЖИМОСТИ

**В.С. Пацко**[1], **А.А. Федотов**[1]

[1]*Институт математики и механики им.Н.Н.Красовского,Екатеринбург*

patsko@imm.uran.ru

Исследуется трёхмерное множество достижимости в моментдля управляемого объекта “машина Дубинса”.Управлением является угловая скорость поворота вектора линейной скорости.Наряду со случаем,когда по постановке задачи поворот возможен в обе стороны,рассматриваются случаи одностороннего поворота. Дано описание сечений трёхмерного множества достижимости по угловой координате. Исследованы закономерности развития множества достижимости. Приводятся результаты моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00410.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКОВЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕЗОНАНСАХ

**А.Г. Петров**

*Институт проблем механики РАН, Москва*

petrovipmech@gmail.com

Рассматриваются три группы маятниковых систем. К первой группе относятся свободные колебания маятника на пружине при двойном резонансе 1:1:2. Изучаются наблюдаемые в эксперименте эффекты: поочередная перекачка энергии вертикальных колебаний в энергию качаний маятника и эффект поворота плоскости качаний маятника. Во второй группе рассматриваются вынужденные колебания маятника на пружине под действием вибрации точки подвеса также при двойном резонансе 1:1:2 и с учетом сил трения. Показано, что за достаточно большое время устанавливаются качания, близкие к гармоническим. Аналитически найдены установившиеся колебания и описан переходный процесс установления. В третьей группе маятниковых систем ставится обратная задача о стабилизации маятниковой системы в заданном положении с помощью управляющих параметров колебаний точки подвеса. Дано решение обратных задач для сферического маятника и для двойного математического маятника. Приводятся асимптотические решения задач, построенные различными методами нелинейной механики: методы гамильтоновой нормальной формы, канонического осреднения, решение уравнений в переменных орбиты, метод осреднения. Проведены аналогии с известными явлениями в физике: резонанс Ферми и расщепление частот в спектре молекулы углекислого газа; резонансное дробление газовых пузырьков в акустической волне. Сравнения с численными расчетами показывает высокую точность построенных асимптотических решений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00373.

## ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

**Д.А. Пелевина[1], Д.И. Меркулов[1], И.М. Зейдис[2], В.А. Турков[1], В.А. Налетова[1]**

[1]*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва*

[2]*Ilmenau University of Technology, 98693, Ilmenau, Ehrenbergstr. 29, Germany*

pelevina.daria@gmail.com

Экспериментально и теоретически исследуется движение тел из упругих намагничивающихся материалов в окружающей немагнитной жидкости на горизонтальной подложке в однородном наклонном переменном во времени поле. Обнаружена зависимость направления движения центра масс тел в зависимости от окружающей жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-31-00066 мол_а (исследование возможности использования тел из намагничивающихся эластомеров для создания движения в магнитных полях) и № 18-501-12011 ННИО_а (численное моделирование движения намагничивающихся сфер, связанных упругим приводом, в переменном магнитном поле).

## ЛЕВ ВАСИЛЬЕВИЧ ОВСЯННИКОВ И ЕГО ТВОРЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ

**В.В. Пухначев[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирскийгосударственный университет, Новосибирск*

pukhnachev@gmail.com

Академик Л.В. Овсянников (1919-2014) – выдающийся советский и российский ученый в области механики и математики. Ему принадлежат основополагающие результаты в газовой динамике, теории поверхностных и внутренних волн, функциональном анализе, обосновании приближенных моделей механики сплошной среды.Разработанные им методы группового анализа дифференциальных уравнений широко применяются в математике, механике и теоретической физике. Л.В. Овсянников сформулировал ряд новых проблем механики, которые не потеряли актуальности до настоящего времени.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОТОКЕ ПРИ ГАЗОСТРУЙНОМ ОСАЖДЕНИИ АЛМАЗНЫХ СТРУКТУР

**А.К. Ребров, М.Ю. Плотников**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

*E-mail: rebrov@itp.nsc.ru*

Проведено численно-экспериментальное исследование физико-химических процессов при газоструйном осаждении алмазных структур из высокоскоростного потока активированного газа. Для активации исходной смеси использовалась термическая активация газа навысокотемпературных поверхностях при течении в канале и активация в плазме СВЧ-разряда. В газодинамических расчётах оказался эффективным метод прямого статистического моделирования. Для анализа изменения состава смеси вследствие газофазных реакций использовался одномерный подход на основе решения системы уравнений равновесной химической кинетики.

Работа выполнена при поддержке интеграционного гранта СО РАН № 47 и гранта РФФИ № 19-08-00533.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНА В КАНАЛЕ С СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

**П.К. Третьяков**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

paveltr@itam.nsc.ru

Приводятся экспериментальные результаты по инициированию и интенсификации горения керосина в сверхзвуковом (число Маха $M_0$= 2,0-2,2), высокотемпературном ($T_0$≈1650К) потоке воздуха в канале постоянного сечения при импульсно-периодическом газодинамическом воздействии на течение. Определены параметры воздействия, исследованы особенности динамики развития процесса и условия сохранения эффективного горения при прекращения воздействия.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ(проект № 17-08-00183).

## УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПОСРЕДСТВОМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ПОДВИЖНОЙ МАССЫ

**Ф.Л. Черноусько[1]**

[1]*Институт проблем механики РАН, Москва*

chern@ipmnet.ru

Управлением движением твердого тела может осуществляться при помощи вспомогательных масс, совершающих специальные движения относительно несущего тела. Этот принцип реализуется в капсульных роботах и представляет интерес для управления ориентацией движущихся аппаратов. Исследованы прямолинейные поступательные, плоские и пространственные движения подобных систем в различных средах. В случае отсутствия внешних сил, построены оптимальные и близкие к ним законы управления, обеспечивающие наискорейшую заданную переориентацию твердого тела.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00307.

## СЕКЦИЯ II. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

### НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭФФЕКТЫ АНОМАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА

**В.В. Аристов**

*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва*

aristovvl@yandex.ru

Изучаются неравновесные газовые течения, в которых с помощью уравнения Больцмана выявлены аномальные соотношения переноса вязких напряжений и тепла (например, на масштабах длины свободного пробега градиент температуры и тепловой поток имеют одинаковые знаки). Аналитические аппроксимации и численные расчеты на основе прямых методов, а также сравнения с решениями по методу статистического моделирования подтверждают существование эффектов. Обсуждаются их отношение ко второму началу термодинамики, допустимые способы экспериментальной проверки и возможные приложения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00899.

### ПОДЪЕМНАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА МАЛЫЕ ЧАСТИЦЫ В СДВИГОВЫХ ПОТОКАХ: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**Е.С. Асмолов[1,2]**

*[1]Институт физической химии и электрохимии РАН, Москва*

*[2]НИИ механики МГУ, Москва*

aes50@yandex.ru

Миграция нейтрально плавучих частиц в плоском канале с конечным числом Рейнольдса Re и условиями прилипания или скольжения на стенках моделируется на основе метода решеточного уравнения Больцмана. Предложено обобщение ранее полученных для малых Re теоретических результатов на случай конечных Re и размеров частиц. В супергидрофобном канале подъемная сила существенно изменяется даже при небольшой эффективной длине скольжения. Два устойчивых положения равновесия становятся несимметричными относительно оси канала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00729.

### ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ СМЕСИ ГАЗООБРАЗНЫЙ ВОДОРОД-ЖИДКИЙ КИСЛОРОД В ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ИСТЕЧЕНИЕМ К ПЕРИФЕРИИ

**Ф.А. Быковский, С.А. Ждан, Е.Ф. Ведерников, А.Н. Самсонов, Е.Л. Попов**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

bykovskii@hydro.nsc.ru

В плоскорадиальной камере с истечением к периферии, с внутренним и наружным диаметрами 100 мм и 300 мм впервые реализованы режимы непрерывной спиновой и непрерывной многофронтовой детонаций в газокапельной смеси газообразный водород-жидкий кислород. Высота детонационного фронта для газокапельной смеси больше, чем для газовой, что обусловлено критическим размером для существования детонации. Центробежные силы, действующие на продукты за фронтом детонационной волны, способствуют более быстрому наполнению плоско-радиальной камеры свежей смесью и увеличивают высоту детонационного фронта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-540001р_а.

### ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ: НОВЫЙ ФАКТОР ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

**Ю.Н. Григорьев [1], И.В. Ершов[2]**

*[1]Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

*[2]Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск*

grigor@ict.nsc.ru

В докладе на основе решения классических задач линейной и нелинейной теорий гидродинамической устойчивости рассматривается влияние релаксации колебательных степеней свободы на подавление акустических возмущений. В качестве математической модели используется система уравнений двухтемпературной газодинамики с релаксационным уравнением Ландау-Теллера Из расчетов устойчивости свободного слоя слвига, течения Куэтта, сверхзвукового пограничного слоя на пластине и других следует, что релаксация увеличивает критические числа Рейнольдса примерно на 15% по сравнению с совершенным газом.

## МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ О ДИНАМИКЕ ВКЛЮЧЕНИЙ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ

**Н.А. Гумеров**[1,2]

[1]*Институт передовых компьютерных исследований университета штата Мэриленд, Колледж-Парк, Мэриленд, США*

[2]*Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем Башкирского государственного университета, Уфа*

gumerov@umiacs.umd.edu

В докладе анализируются преимущества и недостатки метода граничных элементов по сравнению с методами, требующими дискретизации объема течения. Рассматриваются вопросы высокопроизводительных вычислений, в частности, ускорение метода с помощью быстрого метода мультиполей. Приводятся примеры задач о динамике капель, пузырьков и твердых частиц при малых (безынерционные течения) и больших (потенциальные течения) числах Рейнольдса, решаемых с помощью метода граничных элементов. Обсуждаются перспективы метода как инструмента для будущих исследований.

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД

**И.В. Егоров**[1,2], **А.В. Новиков**[1,2], **А.В. Федоров**[2]

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

ivan.egorov@tsagi.ru

Обсуждается проблема высокой чувствительности ламинарно-турбулентного перехода к начальным и граничным условиям. В основном это связано с проблемой восприимчивости – возбуждением неустойчивых мод возмущениями из набегающего потока и/или на поверхности твердого тела. На примере переходного течения около угла сжатия при числе Маха набегающего потока, равном 5.4, показано, что в зависимости от положения и частоты источника внешних возмущений ламинарно-турбулентный переход развивается по качественно различным сценариям.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00969.

## ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ

**Ю.С. Качанов**[1], **В.И. Бородулин**[1], **А.В. Иванов**[1]

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, Новосибирск*

kachanov@itam.nsc.ru

В докладе делается краткий обзор недавних впечатляющих успехов, достигнутых в последние два десятилетия в исследованиях сценариев перехода к турбулентности в пограничном слое скользящего крыла, методов расчёта положения перехода и управления им. В основном рассматриваются случаи, когда переход инициируется стационарными и нестационарными модами неустойчивости поперечного течения. Обсуждаются все стадии процесса перехода к турбулентности, включая различные механизмы: восприимчивости течения к внешним возмущениям, неустойчивости и вторичной неустойчивости, а также окончательной турбулизации течения.

Работа поддержана фирмой Боинг и Программой академий наук 2013-2020 гг. (проект АААА-А17-117030610128-8).

## Секция III. МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ И РАЗНЕСЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕГРАД В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ (ОБЗОР)

**В.Н. Аптуков[1], А.В. Дубинский[2], А.Р. Хасанов[1]**

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

[2]*Университет им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль*

aptukov@psu.ru

Рассматриваются задачи сравнения монолитных преград со слоистыми, а также слоистых преград (СП) различной структуры между собой с точки зрения наилучшего обеспечения защиты против высокоскоростного удара, в том числе, задачи оптимизации СП в условиях возможности выбора материалов из заданного набора. В качестве СП рассматриваются как преграды со слоями в контакте, так и с воздушными зазорами между ними. Большое внимание уделяется обсуждению характерных подходов к проблеме. Приведены решения типичных задач, намечены перспективные направления дальнейших исследований.

### МЕТОД БЛОЧНОГО ЭЛЕМЕНТА В ПРИЛОЖЕНИХ

**В.А. Бабешко[1,2], О.В. Евдокимова[1], О.М. Бабешко[2]**

[1] *Южный научный центр РАН. Ростов-на-Дону*

[2] *Кубанский государственный университет. Краснодар*

babeshko41@mail.ru

Излагаются: результаты точного решения методом блочного элемента граничных задач теории упругости в ряде неклассических областей; применение метода для исследования и решения задач в блочных структурах, проектировании материалов и конструкций; выявление трещин нового типа, дополняющих трещины Гриффитса-Ирвина; прогнозирование землетрясений, цунами и оползней.

Работы поддержаны Госзаданиями на 2019 г. Минобрнауки, проекты (9.8753.2017/8.9), ЮНЦ РАН проекты (00-18-04) №. 01201354241, программы президиума РАН I-16, проект (00-18-21) и I-52 проект (00-18-29), грантов РФФИ (17-08-00323), (18-08-00465), (18-01-00384), (18-05-80008).

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЬДА: МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ

**В.М. Бузник [1], С.К. Голушко [2,3]**

[1]*Всероссийский институт авиационных материалов, Москва*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

bouznik@ngs.ru, s.k.golushko@gmail.com

Представлены результаты системных исследований прочностных свойств ледовых композитов с разными типами наполнителей. Показано, что армирование может существенно повысить прочностные и деформационные свойства льда. Разработан комплексный подход к построению математических моделей нелинейного деформирования изотропных и армированных балок, учитывающий эффект разносопротивляемости при растяжении и сжатии.

**Ключевые слова:** композиционный материал, армированный лед, растяжение, сжатие, изгиб, эксперимент, математическая модель, нелинейность.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-13-00392.

### УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**Р.М. Имаев, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

renat_imayev@mail.ru

В работе показано, что метод всесторонней изотермической ковки позволяет получать однородную ультрамелкозернистую структуру в заготовках с большим сечением.Он предполагает равномерное внесение в заготовки с большим сечением энергии пластической деформации, минимизацию контактного трения между оснасткой и заготовками и осуществление деформационной обработки в наиболее благоприятных для развития динамической рекристаллизации температурно-скоростных условий деформации. Метод продемонстрирован на ряде промышленных сплавов, включая и сплавы с высокой энергией дефекта упаковки.

Работа была выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН (АААА-А17-117041310215-4).

## ВОЛНОВЫЕ И ДИФФУЗИОННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СВЕРХЧИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

**А.М. Кривцов[1,2]**

*[1] Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

*[2] ИПМаш РАН, Санкт-Петербург*

akrivtsov@bk.ru

Анализируются различные механизмы распространения тепла в кристаллических бездефектных материалах. На основе точного решения уравнений движения атомов кристаллической решетки получаются явные формулы и уравнения, описывающие баллистическое распространение тепловых волн. Исследуется влияние закона межатомного взаимодействия и особенностей кристаллической структуры на динамику тепловых процессов. Демонстрируется аналогия с баллистическим движением частиц разреженных газов. Рассматривается механизм перехода к диффузионному распространению тепла, основанный на возникновении микроразрывов кристаллической структуры. Обсуждается применение рассмотренных методов к описанию стохастических волновых процессов на различных масштабных уровнях.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Е.В. Ломакин[1], Б.Н. Федулов[1,2,3], А.Н. Федоренко[2,3], Д.А. Бондарчук[2]**

*[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

*[2]Московский Авиационный Институт, Москва*

*[3]Сколковский институт науки и технологий, Москва*

Fedulov.b@mail.ru

Настоящие исследование затрагивает вопросы упругой стадии деформирования композитов, разрушения, а также влияния производственных процессов на характеристики материала. В работе рассматриваются нелинейные модели упругости, учитывающие зависимость свойств материала от типа нагружения. Сформулирован ряд предположений для построения теории, которая может быть использована для прогнозирования разрушения в слоистых композитах. В работе рассмотрены конкретные примеры моделирования поведения композитных материалов под действием нагрузок и проведено сравнение с результатами экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 18-31-20026, 17-01-00318).

## SMART-МАТЕРИАЛЫ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ И МОНИТОРИНГА И НОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕХАНИКИ

**В.П. Матвеенко, И.Н. Шардаков, Н.А. Юрлова**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

mvp@icmm.ru

Приводится обзор, включающий классификацию smart-материалов, области их применения, выполняемые функциональные задачи, условия, определяющие развитие smart-структур, материалы, используемые для сенсоров и актуаторов, методы моделирования smart-материалов. Подробно в работе рассматриваются две проблемы: математическое моделирование механического поведения деформируемых тел со встроенными пьезоэлементами, к которым подключены внешние электрические цепи, и теоретические и экспериментальные исследования твердых тел с оптоволоконными датчиками деформации, расположенными на поверхности тела или встроенными в их объем.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-00243.

## ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР ТИПА ВОЛН НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ОТКЛИК И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН

**А.Л. Медведский, В.Ф. Копьев, Н.Н. Остриков, С.Л. Денисов**

*Центральный Аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

aleksandr.medvedskiy@tsagi.ru

В работе рассматривается задача взаимодействия акустического излучения крупномасштабных когерентных структур типа волн неустойчивости с упругой полигональной ортотропной пластиной. Волны неустойчивости рассматриваются в качестве элементарных источников звука и представляют собой гармонические по времени колебания струи, описывающиеся с помощью волновых пакетов. Для пластины, подвергающейся акустическому нагружению со стороны волн неустойчивости получены выражения, позволяющее определить напряженно-деформированное состояние и оценить долговечность с помощью различных теорий при различных условиях закрепления пластины по контуру.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01153 А.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИТИЧНОСТИ МНОГОМАСШТАБНОЙ КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ

**О.Б. Наймарк**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

naimark@icmm.ru

Экспериментально и теоретически исследуетсяроль мезодефектов в механизмах структурной релаксации, стадийности развития поврежденности при усталостном, динамическом и ударно-волновом нагружениях на основе установленных закономерностей критичности в средах с дефектами.Предложенные определяющие уравнения отражают особенности метастабильных состояний, обусловленных коллективным поведением дефектов. Показано, что закономерности критичности связаны с формированием коллективных мод дефектов, имеющих природу автомодельных решений, описывающих эффекты локализации и неустойчивости пластической деформации, зарождения и развития трещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00867а.

## ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ РОЛЬ КРИВИЗНЫ В ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

**В.Е. Панин [1,2], В.Е. Егорушкин[1], С.В. Панин[1,2], А.В. Панин[1,2]**

[1]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

[2]*Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет, Томск*

paninve@ispms.ru

Разработана нелинейная теория самосогласованного развития пластических ротаций на мезоскопических масштабных уровнях, учитывающая кривизну решетки и роль электронной подсистемы на наномасштабном уровне. Самоорганизация мезоскопических трансляционно-ротационных мод пластического течения в широком интервале масштабов [макро-нано] лежит в основе высокоэффективных релаксационных процессов, в том числе в материалах, получаемых методами аддитивных производственных технологий, а в также конструкционных материалах, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Министерства науки и высшего образования РФ; Соглашение № 05.583.21.0089, идентификатор проекта RFMEFI58318x0089.

## СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СПЛОШНЫХ СРЕД

**Ю.В. Петров[1,2]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург*

[2]*Институт проблеи машиноведения РАН, С.-Петербург*

y.v.petrov@spbu.ru

Обсуждаются главные принципы структурно-временного подхода, применяемого для моделирования быстрых переходных процессов, таких как разрушение, текучесть, структурные и фазовые превращения в сплошных средах при экстремальных высокоскоростных и ударно-волновых воздействиях. Подход позволяет, в частности, формулировать критерии разрушения, предельные условия динамической текучести, структурных превращений, позволяющие эффективно предсказывать критические параметры динамических нагрузок и объяснять многие наблюдаемые в экспериментах эффекты. Анализируются примеры применения подхода к задачам импульсного разрушения бездефектных сред, прогнозу эффектов динамической текучести и моделированию быстрого роста трещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01053.

## ДИССИПАЦИЯ И НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

**О.А. Плехов**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

poa@icmm.ru

Проведено исследование баланса энергии в металлах при неупругом деформировании и разрушении. Для расчёта тепловой диссипации разработан оригинальный алгоритм обработки данных ИК-термографии. Верификация результатов проведена на основе контактного метода измерения теплового потока. Полученные данные позволили рассчитать механические и термодинамические параметры процесса деформирования и разрушения металлов и ввести критерии разрушения, основанные на расчёте величины скрытой энергии деформации. Эффективность предложенного подхода демонстрируется расчётами локализации тепла в процессе деформирования и разрушения образцов из сталей 03Х18Н11.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-77-30008.

## МИКРОМЕХАНИКА ДЕФЕКТОВ В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

**А.Е. Романов**[1]

[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

alexey.romanov@niuitmo.ru

Рассматриваются результаты аналитических расчетов упругих полей и энергий дислокаций и дисклинаций в телах различной геометрии с внутренними и внешними поверхностями раздела. Анализируются различные математические методы решения граничных задач теории упругости для дефектов. Найденные соотношения применяются для исследования устойчивости дислокаций и дисклинаций в современных функциональных материалах, обладающих внутренней структурой, например, тонкопленочных полупроводниковых гетероструктурах, нано- и микрочастицах, нанопроводах и т.д. Обсуждается, как наличие дефектов и связанных с ними упругих полей влияет на свойства современных функциональных материалов и характеристики устройств на их основе.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00617

## О НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Н.М. Якупов**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

yzsrr@kfti.knc.ru

Исследования механики тонкостенных конструкций, выполненные в ИММ ФИЦ КазНЦ РАН с 1980. Методы исследования: вариант МКЭ, экспериментально-теоретический метод. Коррозионный износ: модель, гипотеза, влияние физических полей и вибрации. Тонкостенные и тонкослойные элементы сложной структуры: концентрация напряжений в локальных углублениях, механические свойства, влияние царапин, адгезия покрытий к подложке, анализ НДС конструкций. Подходы усиления и совершенствования. Разработки награждены 15 медалями Международных Салонов и Выставок, Дипломами ФИПС, включены в 15 Отчетов о деятельности РАН. Статьи в журналах ДАН, МТТ, Проблемы прочности, Прикладная механика… Получены патенты на изобретения.

## ПОДСЕКЦИЯ I-1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

### ЗАДАЧИ МИНИМАКСНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННОГО ОБЪЕКТА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

**В.В. Александров, В.В. Латонов**

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

WLatonov@gmail.com

Приводится решение двух задач минимаксной стабилизации линии визирования инерционного объекта, установленного на подвижном основании. Его движение описывается системой линейных дифференциальных уравнений четвертого порядка. В первой задаче возмущения представлены в виде отклонений начального положения от нуля. Во второй задаче в системе действуют постоянные возмущения. Стабилизация осуществляется посредством линейной обратной связи. Коэффициенты обратной связи вычислены как оптимальные при наихудших возможных возмущениях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-00-01590.

### МЕТОД ФУНКЦИОНАЛОВ ЛЯПУНОВА В ЗАДАЧАХ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.С. Андреев**

*Ульяновский государственный университет, Ульяновск*

AndreevAS@ulsu.ru

В докладе представлено развитие метода функционалов Ляпунова в исследовании устойчивости нелинейных интегро-дифференциальных уравнений Вольтерра. Выведена новая форма достаточных условий устойчивости установившихся движений голономных механических систем с вязкоупругими элементами. Обоснована методика применения нелинейных ПИ- и ПИД-регуляторов в задачах о стабилизации движений управляемых механических систем. Решены задачи о стабилизации движений твердого тела, манипулятора и др.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00791.

### ИНВАРИАНТЫ ДВУМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ В ПОСТРОЕНИИ ИХ ИНТЕГРАЛОВ И СИММЕТРИЙ

**Ю.Ю. Багдерина**

*Институт математики с ВЦ УФИЦ РАН, Уфа*

bagderinayu@yandex.ru

Для системы уравненийЭйлера-Лагранжа, описывающей геодезические на двумерной поверхности с непостоянной кривизной, решена проблема эквивалентности относительно точечных замен переменных. В основном (невырожденном) случае и в случае, когда параметр Бельтрами для гауссовой кривизны равен нулю, получен базис алгебраических и дифференциальных инвариантов системы. Построен полный набор операторов инвариантного дифференцирования, применение которых позволяет получить произвольный инвариант из базисных. Этот результат используется для описания симметрийных свойств системы уравнений геодезических в терминах ее инвариантов и для инвариантной характеристики систем, обладающих интегралом в форме полинома по обобщенным скоростям.

### О НЕОБХОДИМЫХ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ ОРБИТАЛЬНОГО ГИРОСТАТА

**А.В. Банщиков**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. МатросоваСО РАН, Иркутск*

bav@icc.ru

С помощью разработанного на базе пакета компьютерной алгебры «Mathematica»программного обеспечения исследована динамика спутника-гиростата, движущегося в ньютоновском центральном поле сил по кеплеровой круговой орбите.В символьном виде на PC построены линеаризованные уравнения возмущённого движения в окрестности относительного равновесия системы и получены необходимые условия его устойчивости.При параметрическом анализе полученных неравенств рассмотрен один из случаев, когда вектор гиростатического момента системы находится в одной из плоскостей, образуемых главными центральными осями инерции. Найденные области устойчивости имеют аналитический вид или графическое представление в виде 2D-изображений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00301.

### О ПРИЧИНЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЩЕННЫХ СТАБИЛИЗИРУЕМЫХ МАЯТНИКОВ

**Я.Д. Гордин[1], В.А. Грибков[2]**

[1]*АО «ВПК «НПО машиностроения» Реутов М.О.*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва*

zenit-ab@mail.ru

Определена причина радикального рассогласования расчетных и экспериментальных областей устойчивости обращенных стабилизируемых маятников в известной публикация Д. Ачесона, Т. Муллина (журнал «Nature»). С использованием пакетов твердотельно-

го моделирования восстановлены фактические параметры маятников. Найденные по фактическим параметрам расчетные области устойчивости оказались гораздо ближе к экспериментальным областям устойчивости. Полученные авторами данной работы новые экспериментальные и расчетные результаты для тройного маятника, подтверждают правильность обнаруженной причины рассогласования областей устойчивости в статье Д. Ачесона, Т. Муллина.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА В ИСТОЛКОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ В НОВЫХ РЕШЕНИЯХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ОБОБЩЕННЫХ СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

**Г.В. Горр[1], А.В. Мазнев [2], Д.Н. Ткаченко[1]**

[1]*Институт прикладной математики и механики, Донецк*

[2]*Донецкий национальный университет, Донецк*

gvgorr@gmail.com, aleksandr_maznev@rambler.ru, dntkachenko@mail.ru

Доклад состоит из трех частей. В первой части рассматривается комплексный подход в истолковании движения твердого тела, основанный на использовании углов Эйлера, модифицированном методе Пуансо, параметрах Родрига-Гамильтона. Вторая часть посвящена задаче о движении гиростата с переменным гиростатическим моментом. В третьей части выполнен обзор результатов по построению новых форм уравнений динамики твердого тела. Приведены новые решения этих уравнений.

## БЫСТРЫЕ И МЕДЛЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ В ЗАДАЧЕ О КАЧЕНИИ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ ВЯЗКОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА ПО ПОЛУПРОСТРАНСТВУ ИЗ ТОГО ЖЕ МАТЕРИАЛА

**А.А. Зобова**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

azobova@mech.math.msu.su

Рассматривается задача о движении вязкоупругого цилиндра по полупространству из того же материала (недеформированная граница полупространства горизонтальна). Касательные напряжения описываются моделью сухого трения Амонтона–Кулона на участке относительного проскальзывания; учитывается наличие участка сцепления. Параметры контактного взаимодействия определяются решением квазистатической задачи вязкоупругости. Показано, что эта задача является возмущением задачи о качении с проскальзыванием упругого цилиндра. Введены быстрая и медленная переменная, рассмотрена их динамика.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00140.

## ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДВУХ ЗАДАЧДИНАМИКИ ГИРОСТАТА

**А.В. Зыза**

*ГОУ ВПО «Донецкийнациональный университет», Донецк*

z9125494@mail.ru

В докладе исследуются условия существования полиномиальных решений уравнений движения гиростата под действием потенциальных и гироскопических сил и уравнений движения гиростата в магнитном поле с учетом эффекта Барнетта-Лондона. Рассмотрены полиномиальные решения трех обобщенных классов: Стеклова-Ковалевского-Горячева, Коносевича-Позднякович, Докшевича и одного специального полиномиального класса. Построены новые решения рассматриваемых задач, описываемые эллиптическими и гиперэллиптическими функциями.

## ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ КИСЛОТ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

**Е.Д. Изотова[1], Д.С. Тарасов[2]**

[1]*Казанский(Приволжский) федеральный университет, Казань*, [2]*Meanotek, Казань*

izotova.e.d@gmail.com

Реализовано реакционное силовое поле Feuston и Garafoloni, описывающее реакции конденсации и диссоциации кремниевых килот в водном растворе. Для оценки качества полученной модели сконструированы системы, включающие порядка 100 тысяч атомов с разной массовой долей ортокремниевой кислоты. Для олигомеров длинной n=3-6 проанализировано количественное соотношение различных пространственных изомеров. Для ряда изомеров определена последовательность реакций, приводящих к их образованию. Полученные результаты сравниваются с известными экспериментальными данными и результатами ab initio расчетов.

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОМБИНАЦИЙ ПЕРВЫХ ИНТЕГРАЛОВ В АНАЛИЗЕ КОНСЕРВАТИВНЫХ СИСТЕМ

**В.Д. Иртегов, Т.Н. Титоренко**

*Институтдинамики систем и теории управления СО РАН им. В.М.Матросова, Иркутск*

irteg@icc.ru

При качественном анализе консервативных систем на основе метода Рауса-Ляпунова и его обобщений предлагается использовать нелинейные комбинации первых интегралов задачи. Представлено несколько алгоритмов построения таких комбинаций. Их применение демонстрируется на конкретных задачах. Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (грант № НШ-5007.2014.9).

## О ДВИЖЕНИИ ТРЕХКОЛЕСНОГО РОБОТА

**А.В. Карапетян, К.А. Катасонова**

*Московский Государственный Университет, Москва*

avkarapetyan@yandex.ru, xenia.katasonova@gmail.com

Рассматривается задача о движении мобильного робота с двумя ведущими и одним пассивным колесом рояльного типа [1,2] на горизонтальной плоскости. В отличие от [1,2] допускается проскальзывание ведущих колёс; при этом в точках их контакта с опорной плоскостью приложены силы линейного вязкого трения. Найдены все стационарные движения робота (равномерные движения по прямой и по окружности), получены условия их устойчивости и ветвления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-01-00140.

## БИФУРКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ТРЕХ СВЯЗАННЫХ ТЕЛ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ СИЛ ТЯЖЕСТИ

**А.В. Карапетян, М.П. Чаплыгина**

*Московский государственный университет, Москва*

avkarapetyan@yandex.ru

Рассматривается задача о движении трех связанных твердых тел в однородном поле сил тяжести. Найдены все стационарные движения системы, получены условия их устойчивости и ветвления. Результаты исследования представлены в виде бифуркационных диаграмм Пуанкаре-Четаева [1, 2] и Смейла [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 19-01-00140.

## АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И НАТЯЖЕНИЯ ПРОВИСАЮЩЕЙ ЧАСТИ РАСТЯЖИМОЙ ГИБКОЙ НИТИ ПРИ СМАТЫВАНИИ С ДВИЖУЩЕЙСЯ КАТУШКИ ПОД ВОДОЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПЛОСКОСТЬ

**И.А. Керестень, А.А. Михайлов, И.Б. Войнов, А.И. Боровков**

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

keresten@compmechlab.com

Работа посвящена определению формы и натяжения установившегося движения нити при согласованной укладке под водой на постоянную глубину. Объектом исследования является абсолютно гибкая растяжимая однородная нить, движущаяся в сопротивляющейся среде при наличии течения с профилем скорости, изменчивым по глубине. Основными задачами являются: построение аналитической нелинейной модели, учитывающей влияние растяжимости нити при наличии сил сопротивления, обусловленных подводным течением, изменчивым по глубине; разработка алгоритма численного решения нелинейных дифференциальных уравнений. Результаты работы могут быть использованы для инженерной оценки прочности кабеля при кабелеукладке.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ПОИСКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АВТОНОМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПЛОСКОСТИ

**Л.А. Климина**

*НИИ механики МГУ, Москва*

klimina@imec.msu.ru

Обсуждается модификация численно-аналитического итерационного метод поиска периодических решений автономных динамических систем второго порядка. Идея метода подобна подходу Понтрягина для поиска циклов систем близких к гамильтоновым. Основное отличие в том, что не предполагается наличие малого параметра в системе. Отсутствие малого параметра «компенсируется» построением последовательных приближений. Приведен пример применения метода для описания циклов в модели ветро/гидроэнергетической установки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20029.

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ТЕОРИИ ПОЛЕТА АРТИЛЛЕРИЙСКОГО СНАРЯДА

**Б.И. Коносевич, Ю.Б. Коносевич**

*Институт прикладной математики и механики, Донецк*

konos.donetsk@yandex.ru

Модифицированная модель материальной точки позволяет в десятки раз уменьшить вычислительные затраты при расчете траектории снаряда. Известны два подхода к построению такой модели. Один из них основан на физически мотивированном определении положения динамического равновесия оси симметрии снаряда, при другом подходе это положение определяется квазистационарным решением уравнений углового движения оси симметрии. Получены математические оценки погрешности траекторий снаряда, определяемых соответствующими двумя модифицированными моделями материальной точки, по сравнению с траекторией, определяемой уравнениями движения снаряда как твердого тела.

## НОВЫЕ ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НА ХОЛОДНЫХ АТОМАХ, ОТЛИЧАЮЩИЕСЯ ОТ ЭФФЕКТА САНЬЯКА

**Н.И. Кробка**

*Научно-исследовательский институт прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (филиал "ЦЭНКИ"), Москва*

KrobkaNick@msn.com

Представлено множество кинематических гироскопических эффектов во вращающемся контуре, частным случаем которых является эффект Саньяка. Замечена асимметрия корпускулярно-волнового дуализма "волна-частица" (Альберт Эйнштейн) - "частица-волна" (Луи де Бройль) в гироскопических эффектах: увеличение чувствительности к вращению при переходе от фотонов к холодным атомам колоссально превосходит увеличение чувствительности при переходе от световых волн к волнам де Бройля – в (1013 ÷ 107) раз при температуре атомов (10-9 ÷ 10-3) К. Предложено использовать в гироскопии свойства частиц (на основе кинематических эффектов) вместо традиционно используемых свойств волн (на основе интерференции).

## НОВЫЙ – "КИНЕМАТИЧЕСКИЙ" – ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП

**Н.И. Кробка**

*Научно-исследовательский институт прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (филиал "ЦЭНКИ"), Москва*

KrobkaNick@msn.com

Представлен новый – "кинематический" – гироскопический принцип – зависимость интервала времени пролета "носителем гироскопического эффекта" интервала вращающегося контура от абсолютной угловой скорости вращения контура. Носители гироскопического эффекта – это, по определению, тела, частицы или волны, движение которых в инерциальном пространстве не увлекается на 100 % средой вращающегося контура. Кинематический гироскопический принцип позволяет однозначно определять величину абсолютной угловой скорости и направление вращения без ограничений на диапазон измерений угловой скорости и без использования фазовых модуляторов в отличие от интерферометрического гироскопического принципа.

## ПРЕДЕЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ ГОЛОНОМНЫХ СИСТЕМ НА БЫСТРО ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

**Е.И. Кугушев, Т.В. Попова**

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва*

t.shahova@yandex.ru

Для голономной системы на поступательно вибрирующем основании получены условия существования направляющего вектора вибраций, при котором положение равновесия, имеющееся у системы без вибраций, сохранится при стремлении частоты вибраций к бесконечности. В невырожденном случае такое положение равновесия предельной системы всегда можно сделать устойчивым.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00887.

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ НЕСВОБОДНОЙ ТРЕНОГИ НА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛОСКОСТИ С ВЯЗКИМ ТРЕНИЕМ

**Е.И. Кугушев, Т.В. Попова, М.О. Селезнева**

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва*

seleznyova.margarita@yandex.ru

Изучается движение твердого тела (треноги), вращающегося вокруг неподвижной вертикальной оси и опирающегося на равномерно вращающуюся горизонтальную плоскость. В точках опоры на треногу действуют силы линейного вязкого трения. Если расстояние между осями вращения опорной плоскости и треноги не слишком велико, то тренога асимптотически выходит на единственный периодический режим движения. Проведено сравнение аналитически и численно найденных зависимостей периода этого движения от расстояния между осями вращения плоскости и треноги. Показана возможность определения параметров модели линейного вязкого трения по этим зависимостям. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00887.

## ОСУЩЕСТВОВАНИИ ЛИУВИЛЛЕВЫХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О КАЧЕНИИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ ПО СФЕРЕ

**А.С. Кулешов, В.А. Катасонова**

МГУ им. М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет, Москва

kuleshov@mech.math.msu.su

Рассматривается задача о качении без проскальзывания динамически симметричного тела, ограниченного поверхностью вращения, по неподвижной сфере. Предполагается, что силы, приложенные к твердому телу, имеют равнодействующую, приложенную к центру масс G тела, направленную к центру O опорной сферы, и зависящую только от расстояния между точками G и O. В этом случае решение задачи сводится к интегрированию линейного дифференциального уравнения второго порядка относительно компоненты угловой скорости тела в проекции на его ось динамической симметрии. С помощью алгоритма Ковачича исследуется вопрос о существовании лиувиллевых решений в данной задаче в случае, когда катящееся твердое тело представляет собой неоднородный динамически симметричный шар, параболоид вращения эллипсоид вращения.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-01-00123 и № 19-01-00140.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ СЛОЖНОГО МАЯТНИКА ПРИ НАЛИЧИИ СОУДАРЕНИЙ

**А.П. Маркеев**

*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*

anat-markeev@mail.ru

Исследуется движение сложного маятника в однородном поле тяжести. Маятник представляет собой тонкий стержень, один из концов которого шарнирно закреплен. Вдоль стержня может двигаться без трения материальная точка. Время от времени точка абсолютно упруго соударяется с другим концом стержня. Существует такое движение маятника, когда стержень покоится на вертикали, проходящей через точку подвеса, а материальная точка движется вдоль стержня, периодически подскакивая над его нижним концом на некоторую высоту, не превосходящую длину стержня. Решена нелинейная задача об орбитальной устойчивости этого движения маятника. Доклад подготовлен в рамках государственного задания (№ регистрации АААА-А17-117021310382-5) при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17 - 01 - 00123).

## ВЕТВЛЕНИЕ ФОРМ РАВНОВЕСИЯ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС

**Н.В. Можгова, А.В. Лукин, И.А. Попов**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт прикладной математики и механики, кафедра "Механика и процессы управления", Санкт-Петербург*

mozhgova.nv@edu.spbstu.ru

В настоящей работе исследованы нелинейные задачи ветвления форм равновесия упругих элементов нано- и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Построены бифуркационные диаграммы для некоторых типов подвижных элементов МЭМС (струны, балки, пластины) с учетом различных конфигураций расположения электродов.На основе точных и приближенных аналитических решений отработаны методы численного решения нелинейных краевых задач в частных производных, описывающих статику упругих элементов, и продолжения найденных решений по параметрам. Изучена статика балочного элемента МЭМС в поле одного электрода.

## О КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ГАМИЛЬТОНОВЫХ СИСТЕМ

**А.Д. Морозов, К.Е. Морозов**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского*

morozov@mm.unn.ru

Рассматриваются неконсервативные квазипериодические возмущения двумерных нелинейных гамильтоновых систем. Предполагается, что возмущение является линейной комбинацией функций фазовых переменных с коэффициентами (параметрами), зависящими от времени квазипериодически, т.е. содержащими $m>1$ несоизмеримых частот$\omega_1,\ldots,\omega_m$.. Устанавливаются условия существования резонансных квазипериодических решений нового типа, отвечающих $(m+1)$-мерным торам с частотами, кратными $\omega_1,\ldots,\omega_m,\omega_0$, где$\omega_0$ мало вместе с возмущением. Используя усредненную систему, исследуется структура резонансных зон. Также рассматривается вопрос синхронизации квазипериодических колебаний. Исследование иллюстрируется на примере уравнения типа Дуффинга.Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00306.

## ДИНАМИКА КЕЛЬСТКОГО КАМНЯ НА ПЛОСКОСТИ С ВЯЗКИМ ТРЕНИЕМ

**М.А. Муницына**

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

munitsyna@gmail.com

Рассматривается задача о движении кельсткого камня на неподвижной горизонтальной плоскости с вязким трением. На плоскости параметров задачи строятся области устойчивости равномерных вращений вокруг вертикали. Исследуется динамика переходных процессов от неустойчивых движений к устойчивым.

Работа выполнена при поддержке грантовРФФИ №19-01-00583, 18-01-00335 и Программы №29 Президиума РАН.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯРНОЙ ПРЕЦЕССИИ В СЛУЧАЕ ЧАСТНОГО ИНТЕГРАЛА ГЕССА

**М.А. Новиков**

*Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск*

nma@icc.ru

Вторым методом Ляпунова проведено исследование устойчивости одного стационарного движения механической системы, состоящей из твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной точки в случае частного интеграла Гесса. Достаточные условия устойчивости исследуемой консервативной системы устанавливаются построением знакоопределенной связки из первых интегралов возмущенного движения. Для проведения большого количества вычислений применяется система аналитических вычислений.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект N 19-08-00746).

## ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА ШАРОВЫХ ВЕКТОРОВ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ

**В.В. Новиков, Л.Н. Февральских**

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

grigorieva_ln@mail.ru

Демонстрируется подход к решению задач механики, обладающих сферической симметрией формы тел или свойств среды, основанный на применении аппарата шаровых векторов. Приводится ряд задач динамики твердого деформируемого тела и гидродинамики, для которых авторами получено приближенное аналитическое решение, позволяющее выявить качественные особенности динамики среды. Более подробно использование аппарата шаровых векторов рассматривается на примере задачи магнитной гидродинамики в квазисферическом слое. Полученные результаты могут быть полезны для изучения динамики Земли и механизма магнитного динамо.

## НОВЫЕ ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПУАНКАРЕ – ЖУКОВСКОГО И УРАВНЕНИЙ КИРХГОФА

**В.Ю. Ольшанский**

*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

olshanskiy_vlad@mail.ru

Построено описание линейных инвариантных соотношений и систем для уравнений Пуанкаре – Жуковского и Кирхгофа, найдены новые семейства решений. Выделены частные случаи нерегулярной и регулярной прецессий. Найдены условия регулярной прецессии твердого тела с жидким наполнением в общем случае. Показано, что если ось собственного вращения совпадает с главной осью инерции, то достаточно одного конфигурационного условия, иначе условий два. Рассмотрена регулярная прецессия тела с жидким наполнением в случае, когда отличие между экваториальными моментами инерции значительно меньше, чем отличие между экваториальным и полярным моментами.

## О ВЛИЯНИИ ЖЕСТКОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Ю.Д. Селюцкий**

*МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИ механики, Москва*

seliutski@imec.msu.ru

Рассматривается механическая система с двумя степенями свободы, поведение которой описывается линейными дифференциальными уравнениями. Обсуждается влияние на устойчивость тривиального положения равновесия изменения жесткости по одной из обобщенных координат. Показано, в частности, что при определенных значениях параметров системы увеличение коэффициента жесткости может привести к потере устойчивости, и наоборот, его уменьшение – к стабилизации положения равновесия. В качестве примера рассмотрены колебания двухзвенного аэродинамического маятника в окрестности положения равновесия «по потоку».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00538.

## АНАЛИЗ РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ОДНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

**С.Н. Стребуляев, К.М. Соловьева**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23*

sstrebuliaev@mail.ru

В работе рассматривается задача исследования робастной устойчивости электромеханических систем, включающих в себя систему управления и двигатели. Решение задачи осуществляется с использованием системы аналитических вычислений Maple. В работе приведено сравнение результатов, полученных авторами при математическом моделировании указанных объектов, а также при использовании известных методик и теорем, приведенных в работеХаритонова В. Л.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№18-41-520002).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ, РОЖДАЮЩИХСЯ ИЗ РЕГУЛЯРНОЙ ПРЕЦЕССИЙ СИММЕТРИЧНОГО СПУТНИКА

**Е.А. Сухов**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

sukhov.george@gmail.com

Рассматривается движение динамически симметричного спутника относительно центра масс на круговой орбите. Частным случаем такого движения является гиперболоидальная прецессия. Исследуется задача о бифуркации и орбитальной устойчивости периодических движений спутника, рождающихся из его гиперболоидальной прецессии. В малой окрестности этой прецессии данные движения были построены аналитически, а затем численно продолжены до границ областей существования. Построенадиаграмма, описывающая бифуркации указанных решений, и получены выводы обих орбитальной устойчивости в линейном приближении.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 3.3858.217/4.6.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЛИНЕАРНЫХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОГРАВИТАЦИОННОЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ С ДВУМЯ ИЗЛУЧАЮЩИМИ МАССАМИ

**А.Т. Турешбаев, У.Ш. Омарова, Р.С. Мырзаев**

*Кызылординский государственный университет имени Коркыт Ата, Казахстан*

aturesh@mail.ru, myrza_ramatilla@mail.ru, ylbosin_kz@mail.ru

Изучается устойчивость облачных скоплений газопылевых частиц в поле двойных звездных систем. В качестве динамической модели рассматривается фотогравитационная ограниченная задача трех тел с двумя излучающими массами. Исследуется устойчивость коллинеарных точек либрации в пространственной задаче в нелинейной постановке. Получаются результаты по устойчивости для большинства (в смысле меры Лебега) начальных условий и формальной устойчивости. Ранее были известны выводы по устойчивости в резонансных случаях (Н.В.Тхай).

## О НЕЕДИНСТВЕННОСТИ ДВИЖЕНИЙ В ДИНАМИКЕ СИСТЕМ С СУХИМ ТРЕНИЕМ

**Л.Ш. Хакимуллина**

*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

Hackimullina.lara@yandex.ru

На примере Пенлеве – Клейна доказана ошибочность вывода о неединственности решения уравнений движения в области, определенной параметрами механической системы. Показано, что выявленная ошибка связана с тем, что при выводе о неединственности решения задачи игнорировалась зависимость направления вектора суммы кулоновской силы трения и реакции стержня, связывающего материальные точки, от указанных параметров.

## О НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНОГО СПУТНИКА ПРИ РЕЗОНАНСАХ 1:1 И 1:1:1

**О.В. Холостова**

*Московский авиационный институт (научный исследовательский университет), Москва*

kholostova_o@mail.ru

Рассматриваются движения динамически симметричного спутника (твердого тела) относительно центра масс в центральном ньютоновском гравитационном полена круговой или слабоэллиптической орбите, происходящие в окрестности его цилиндрической прецессии при резонансах 1:1 и 1:1:1. Решен вопрос о существовании и устойчивости периодических движений оси симметрии спутника, методами КАМ-теории изучены двух- и трехчастотные условно-периодические движения. Особо выделены случаи вторичных резонансов — случаи нулевой частоты и равных частот в преобразованной приближенной линеаризованной системе.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 3.3858.2017/4.6).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОСКИХ ВРАЩЕНИЙ СПУТНИКА-ПЛАСТИНКИ НА КРУГОВОЙ ОРБИТЕ В СЛУЧАЕ РЕЗОНАНСОВ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКОВ

**Е.А. Чекина**

*Московский авиационный институт (научный исследовательский университет), Москва*

chekina_ev@mail.ru

Исследуется задача об орбитальной устойчивости плоских маятниковых вращений спутника относительно центра масс на круговой орбите. Спутник моделируется твердым телом, обладающим геометрией масс пластинки. Предполагается, что в невозмущенном движении плоскость спутника-пластинки перпендикулярна плоскости орбиты.В работе выполнен строгий нелинейный анализ орбитальной устойчивости плоских маятниковых вращений для неисследованных ранее значений параметров задачи, отвечающих границам областей устойчивости в первом приближении, на которых реализуются резонанс первогопорядка и комбинационный резонанс.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 3.3858.217/4.6.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВРАЩЕНИЯ СФЕРОИДА ВОКРУГ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ ПРИ НАЛИЧИИ АБСОЛЮТНО УПРУГИХ СОУДАРЕНИЙ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ

**Т.Е. Чуркина**

*Московский авиационный институт (научный исследовательский университет), Москва*

tatiana802@mail.ru

Рассматривается движение однородного сфероида над неподвижной абсолютно гладкой горизонтальной плоскостью с соударениями о плоскость, удар абсолютно упругий. В невозмущенном движении сфероид вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью, а его центр тяжести в промежутках между соударениями движется по фиксированной вертикали. В строгой нелинейной постановке исследуется устойчивость такого движения относительно угла отклонения оси симметрии сфероида от вертикали. Получены аналитические выражения условий устойчивости и неустойчивости через параметры задачи, построены геометрические иллюстрации полученных результатов.

## ДИНАМИКА САНЕЙ ЧАПЛЫГИНА НА ШЕРХОВАТОЙ ПЛОСКОСТИ

**А.Ю. Шамин**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

Shamin_ay@mail.ru

Рассматривается задача о движении саней Чаплыгина по шероховатой горизонтальной плоскости. Задача рассмотрена в неголономной постановке: в предположении, что лезвие не может скользить в направлении, перпендикулярном его плоскости. Также предполагается, во всех трёх точках контакта на тело действуют силы сухого трения. Автором выписаны уравнения движения рассматриваемой системы и дан качественный анализ движения тела, исследован фазовый портрет системы в окрестности положения равновесия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00140.

## ИНТЕГРИРУЕМЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ДИССИПАЦИЕЙ

**М.В. Шамолин**

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*

shamolin@rambler.ru, shamolin@imec.msu.ru

В задачах динамики изучаются механические системы со многими степенями свободы с диссипацией (с пространством положений – гладкой поверхностью). Так, например, изучение сферического маятника в потоке набегающей среды приводит к системе четвертого порядка. Системы, описывающие движение такого маятника, обладают переменной диссипацией, и полный список первых интегралов состоит из трансцендентных (в смысле комплексного анализа) функций, выражающихся через конечную комбинацию элементарных функций. В работе обсуждаются вопросы интегрируемости механических систем,в которых силовые поля обладают переменной диссипацией и обобщают ранее рассмотренные.

## ПОДСЕКЦИЯ I-2. УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОИСК ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ПРИ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЗАТРАТЕ

**В.В. Аветисян[1], В.С. Степанян[1]**

[1]*Ереванский государственный университет, Ереван*

vavetisyan@ysu.am, vahan.stepanyan@ysu.am

Рассматривается задача оптимального управления пространственным движением динамического объекта с целью поиска подвижного объекта, совершающего простое движение в прямоугольной области на плоскости. В качестве критерия оптимальности рассматривается функционал, учитывающий энергозатрату источника света, расположенного на ищущем объекте. Искомый объект считается обнаруженным при попадании в световой квадрат заданной освещенности. Предложен способ управления движением ищущего объекта, а также соответствующий закон изменения электрического тока в цепи источника света, обеспечивающие обнаружение искомого объекта за гарантированное время поиска при минимальной световой энергозатрате.

Работа выполнена при поддержке гранта Государственного комитета по науке МОН РА № 18Т-2С127.

### ОБЛАСТЬ ДОСТИЖИМОСТИ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

**В.В. Александров, Д.И. Бугров, С.К.Пилюгина**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

d.bugrov@mech.math.msu.su

В докладе рассмотрена задача о нахождении «наибольшей» и «наименьшей» областей достижимости линейной стационарной вполне управляемой системы второго порядка с гурвицевой матрицей, коэффициенты которой принадлежат заданным интервалам. Считается, что управление принадлежит множеству кусочно-непрерывных ограниченных функций. Показано, что границы области достижимости исходной системы зависят от размеров области достижимости системы, равносильной уравнению второго порядка, и от матрицы перехода. Для системы, равносильной уравнению второго порядка, найдены значения параметров, обеспечивающих максимальный размер ее области достижимости по первой координате.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ЗА КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ НЕКОТОРЫХ СИСТЕМ С КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**И.М. Ананьевский**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

anan@ipmnet.ru

Изучаются некоторые задачи управления движением платформы, несущей упругие звенья. Платформа моделируется твердым телом с подвешенными к нему линейными осцилляторами. Тело движется по горизонтальной прямой под действием ограниченной управляющей силы и малого неконтролируемого возмущения, например, сил сухого трения. Предполагается, что не все фазовые переменные, описывающие состояние осцилляторов, доступны для измерений. Построены законы управления в форме обратной связи, приводящие несущее тело в заданное терминальное положение за конечное время.

Работа выполнена в рамках Госзадания АААА-А17-117021310387-0 и Программы РАН I.2.30 АААА-А17-117121120031-8.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗАЦИИ СВЯЗЕЙ ПРИ КРАТНЫХ КОРНЯХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

**К.З. Аскарова[1], И.Е. Каспирович [1]**

[1]*Российский университет дружбы народов, Москва*

kamilaska24@gmail.com

В данной .работе приводится метод самоопределения параметров возмущения при стабилизации связей Баумгарта. Для упрощения процедуры рассматривается случай кратных корней характеристического уравнения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00261 А.

### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫМИ УКЛОНЕНИЯМИ В ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ

**Д.В. Баландин [1], М.М. Коган [2]**

[1]*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

[1]*Нижегородский архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород*

dbalandin@yandex.ru

Вводится понятие максимального уклонения выхода линейной нестационарной системы на конечном интервале времени как максимального по всем внешним возмущениям и начальным состояниям значения максимальной по времени евклидовой нормы выхода при условии, что сумма квадрата энергии внешнего возмущения и квадратичной формы начального состояния системы равна единице. Максимальное уклонение характеризуется в терминах решений дифференциальных матричных уравнений или нера-

венств. Показано, что синтез оптимальных управлений, в том числе и многокритериальных, минимизирующих максимальные уклонения нескольких выходов, осуществляется в терминах линейных матричных неравенств.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-01-520002 и № 19-01-00289.

## УПРАВЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИМ РОБОТОМ С МАЯТНИКОВЫМ ПРИВОДОМ В ЗАДАЧЕ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ

**Д.В. Баландин[1], Р.С. Бирюков [1,2], М.М. Коган [2]**
[1]*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*
[2]*Нижегородский архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород*
dbalandin@yandex.ru

В работе рассматривается математическая модель безотрывного движения сферического робота по произвольной неровной поверхности как с учетом скольжения сферической оболочки, так и в отсутствие скольжения. Синтезированы законы управления в форме обратной связи по состоянию, обеспечивающие движение робота вдоль заданной траектории. Работоспособность предложенных законов управления подтверждается результатами компьютерного моделирования.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-41-520002, №19-01-00289.

## ОБ УПРАВЛЕНИИ КОЛЕБАНИЯМИ СТРУНЫ С НЕРАЗДЕЛЕННЫМИ МНОГОТОЧЕЧНЫМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

**В.Р. Барсегян**
*Институт механики НАН Армении, Ереванский государственный университет*
barseghyan@sci.am

Для уравнения колебания струны с заданными начальным, конечным условиями и неразделенными значениями прогиба в промежуточных моментах времени исследуются задачи управления колебаниями и оптимального управления с критерием качества, заданным на весь промежуток времени. Используя методы теории управления и оптимального управления конечномерными системами с неразделенными многоточечными промежуточными условиями построены решения рассматриваемых задач. В качестве приложения предложенного подхода построены функции управления и оптимального управления для колебания струны с заданным нелокальным значением прогиба точек струны в некоторых двух промежуточных моментах времени.

## МНОГОГИПОТЕЗНЫЙ АЛГОРИТМ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ

**Д.А. Бедин, А.Г. Иванов, А.А. Федотов**
*Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург*
iagsoft@imm.uran.ru

Рассматривается задача восстановления траектории воздушного судна (ВС) по входящим радиолокационным измерениям: после поступления очередного замера алгоритм должен «моментально» дать оценку положения ВС. Алгоритм строит пучок траекторий, каждая из которых представляет собой некоторый вариант движения ВС, совместимый с его динамическими возможностями. При получении очередного замера, проводится ряд операций над пучком, в том числе, происходит формирование оценки текущего положения ВС. Применение описанного подхода позволило создать алгоритм устойчивый к возможным выбросам замеров.
Работа поддержана РФФИ в рамках проекта № 18-01-00410.

## ОБ ОДНОМ ЧИСЛЕННОМ МЕТОДЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛОШНЫХ СРЕД ПО НЕСКОЛЬКИМ ТЕСТОВЫМ СИГНАЛАМ

**И.В. Бойков, Н.П. Кривулин, В.А. Рязанцев**
*Пензенский государственный университет, Пенза*
i.v.boykov@gmail.com, krivulin@bk.ru, ryazantsevv@mail.ru

В работе предложены методы идентификации механических характеристик сплошных сред по результатам наблюдения входных и выходных сигналов физических систем. Методы основаны на определении коэффициентов дифференциальных уравнений в частных производных, которыми описывается исследуемый физический процесс. В работе предлагаемый численный метод идентификации иллюстрируется на примере уравнения теплопроводности.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00594.

## ОПТИМАЛЬНОЕ И БЛИЗКОЕ К ОПТИМАЛЬНОМУ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ПРОТИВОУДАРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ С УПРЕЖДЕНИЕМ

**Н.Н. Болотник [1], В.А. Корнеев [2]**
[1]*Институт проблем механики РАН, Москва*
[2] *Институт проблем механики РАН, Москва*
korneev@ipmnet.ru

Рассмотрена задача противоударной изоляции объекта, расположенного на подвижной платформе. Для управления, оптимального для мгновенного удара, найден гарантирующий момент упреждения, обеспечивающий наилучшее качество противоударной изоляции при наихудшем возмущении с заданными длительностью и интегралом по времени. Построено также гарантирующее упреждающее управление с одним переключением, получены соответствующие значения максимального смещения объекта относи-

тельно основания. Показано, что управление для мгновенного удара при гарантирующем времени упреждения дает значение критерия качества, близкое к оптимальному.

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А17-117021310387-0 при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17-01-00538-а и 17-08-00742-а).

## УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХЗВЕННОЙ МОДЕЛЬЮ СНОУБОРДИСТА

**А.В. Борисов [1], И.Е. Каспирович[2], Р.Г. Мухарлямов[2]**

[1]*Филиал ФГБОУ ВО НИУ Московский энергетический институт, Смоленск*

[2]*Российский университет дружбы народов, Москва*

kaspirovich.ivan@mail.ru

В данной работе трехзвенный стержневой механизм моделирует движение сноубордиста. Для управления вертикальными звеньями вводятся голономные связи, обеспечивающие физиологическую возможность и удобство положения и ориентации звеньев относительно друг друга. В уравнениях движения слагаемые силы реакции определяются с помощью произвольных множителей Лагранжа. Для обеспечения устойчивости численного решения применяется метод стабилизации связей. Таким образом управляющие силы представляют собой обобщенные силы реакции связей, зависящие от параметров стабилизации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00261 А.

## О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ГРАНИЦ ОБЛАСТЕЙ ДОСТИЖИМОСТИ

**Д.И. Бугров, А.М.Формальский**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

d.bugrov@mech.math.msu.su

Рассматриваются линейные стационарные системы с одним управляющим (возмущающим) воздействием. Предполагается, что система является вполне управляемой в смысле Калмана, а воздействие принадлежит тому или иному множеству функций, называемых допустимыми управлениями. Целью работы является исследование свойств границ областей достижимости таких систем при изменении времени, в частности, в окрестности конических угловых точек, а также оценка влияния ограничений по управлению на границы области достижимости. Аналитические результаты подтверждаются численным моделированием.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-00-01590.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БОРТОВОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

**К.А. БУРДИНОВ[1], А.И. КАРПОВ[2], В.А.КРЕНЕВ[2], А.Е. СМИРНОВ[3]**

[1]*АО «Стелла-К». Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева–КАИ. Казань*

[3]*НПО «Государственный институт прикладной оптики». Казань*

vialkr@yandex.ru

Построена математическая модель оптико-электронного прибора, установленного на борту летательного аппарата. Учитывается движение летательного аппарата и его вибрация в месте установки прибора. Определены требования к динамической точности системы автоматического управления на основе допустимой функции передачи модуляции оптико-электронного прибора. Проведен синтез алгоритмов управления.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ НА ПРЯМОЙ С СУХИМ ТРЕНИЕМ

**Т.В. Глазков[1,2], Т.Ю. Фигурина [1]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

t.glazkov@bk.ru

Изучен периодический режим движения системы, состоящей из корпуса и движущегося внутри него по наклонной направляющей тела, вдоль горизонтальной шероховатой прямой. Решена задача максимизации средней скорости корпуса. Показано, что оптимальное движение происходит при наименьшем коэффициенте трения, позволяющем безреверсное движение корпуса, максимальном значении модуля относительного ускорения внутреннего тела и угле наклона, при котором сила нормального давления корпуса на плоскость равна нулю на некоторых интервалах времени.

Работа выполнена в соответствии с темой госзадания АААА-А17-117021310387-0, при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-01-00652).

## ПРОБЛЕМА МОМЕНТОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ БЛОКА НЬЮТОНОМЕТРОВ НА ПРЕЦИЗИОННОМ СТЕНДЕ

**А.А. Голован, А.И. Матасов**

*Лаборатория управления и навигации механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

alexander.matasov@gmail.com

Задача совместной калибровки блока ньютонометров и диагностики высокоточного стенда исследуется как задача оценивания. К этой задаче оценивания применяется гарантирующий подход. При помощи теории двойственности выпуклых вариационных задач получен оптимальный план калибровки с минимальным суммарным числом угловых положений стенда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00054-а.

## НАХОЖДЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО МОМЕНТА, ПЕРЕВОДЯЩЕГО ТВЕРДОЕ ТЕЛО ИЗ ОДНОГО УГЛОВОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ, С ПОМОЩЬЮ МИНИМИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ

**В.В. Додонов, М.П. Юшков**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

v_dod@mail.ru, yushkovmp@mail.ru

В работе рассматривается нахождение управляющего момента, приложение которого переводит твердое тело за заданное время из одного углового состояния в другое. Для этого минимизируются некоторые функционалы, зависящие от старших производных угловых координат. Особое внимание уделяется плавности движения в начальный и конечный моменты времени. Эта особенность важна при применении теории для ориентации искусственных спутников Земли. Для выполнения этого условия берутся дополнительные производные от подынтегральной функции.

## УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ БОЛЬШОГО НАЗЕМНОГО ПОЛНОПОВОРОТНОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

**В.В. Дубаренко[1], А.Ю. Кучмин[1], Ю.Н. Артеменко[2]**

*[1]Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург, Россия.*

*vladimir.dubarenko@gmail.com*

*[2]Астрокосмический центр Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук (АКЦ ФИАН), г. Москва, Россия*

Профили отражающих поверхнстей больших наземных радиотелескопов, предназначенных для приема сигналов от удаленных космических источников радиоизлучений в верхней части миллиметрового диапазона, не должны отличаться от теоретических профилей более 0.02 мм. При изменении углового положения антенн радиотелескопов, это условие не выпполняется из-за деформаций крупногабаритных поддерживающих конструкций антенн от действия на них весовых, ветровых и тепловых воздействий. Для компенсации этих деформаций, поверхности отражающих зеркал радиотелескопов выполняются автоматически регулируемыми. В докладе излагаются принципы построения одного из вариантов регулируемой поверхности строящегося радиотелескопа РТ-70 «Суффа» (Узбекистан).

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К ЗАДАЧАМ СТАБИЛИЗАЦИИ С НУЛЕВЫМИ КОРНЯМИ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ

**А.Я. Красинский[1,2], А.А. Юлдашев [2]**

*[1]Московский государственный университет пищевых производств, Москва*

*[2]Московский авиационный институт, Москва*

krasinsk@mail.ru

Дано развитие комплексного применения аналитической механики, нелинейной теории устойчивости и теории управления к задачам стабилизации движений систем с геометрическими связями. На основе построенной методами аналитической механики нелинейной математической модели с применением программного пакета MatLab решены задачи стабилизации движений манипуляторов с геометрическими связями с учетом динамики электроприводов. Коэффициенты управления и системы оценивания определены из решения соответствующих линейно-квадратичных задач. Их значения найдены из решений соответствующих алгебраических уравнений Риккати.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ ДВИЖЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КРИТИЧЕСКИХ СЛУЧАЯХ ПРИ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

**А.Я. Красинский[1,2], А.А. Юлдашев [2]**

*[1]Московский государственный университет пищевых производств, Москва*

*[2]Московский авиационный институт, Москва*

krasinsk@mail.ru

Из **с**труктурыпостроенных методами аналитической механики нелинейных математических моделей динамики многомерных механических систем выделяется линейная управляемая подсистема возможно меньшей размерности, асимптотическая устойчивость по

переменным которой, согласно принципу сведения теории критических случаев, обеспечивает устойчивость в полной нелинейной замкнутой системе. Отрицательность действительных частей корней характеристического уравнения управляемой подсистемы достигается за счет приложения линейных управлений, коэффициенты которых, а при неполной информации – и коэффициенты системы оценивания определяются методом Н.Н.Красовского из решения соответствующих линейно-квадратичных задач.

## ЧАТТЕРИНГ РЕЖИМЫ В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ ТВЕРДОГО ТЕЛА С УПРУГИМ СТЕРЖНЕМ

**Е.П. Кубышкин**

*Ярославский государственный университет им. П.Г.Делидова, Ярославль*

kubysh.e@yandex.ru

Рассматривается задача оптимального поворота механической системы, состоящей из твердого тела с упругим прямолинейным стержнем постоянного сечения, жестко прикрепленным одним концом к твердому телу. Поворот осуществляется моментом внешних сил, приложенным к оси, проходящей через центр масс твердого тела перпендикулярно средней линии недеформированного стержня. Рассмотрены две задачи оптимального управления -- задача перевода механической системы из начального фазового состояния в конечное в заданный момент времени с минимизацией величины управляющего момента (нормы управляющего момента в пространстве $L_\infty$) и задача быстродействия при ограничении величины управляющего момента. Показано, что оптимальные управления, дающие решения сформулированных задач, могут иметь счетное число переключений (разрывов первого рода).

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ РАЗРЫВНЫХ МОДЕЛЕЙ В МЕХАНИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

**Н.В. Кузнецов[1,2], Т.Н. Мокаев[1], М.В. Юлдашев[1], Р.В. Юлдашев[1]**

*[1]Санкт-Петербургский государственный университет*

*[2]Институт Проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

*renatyv@gmail.com*

В докладе обсуждается развитие теории дифференциальных включений и ее применение для анализа устойчивости и колебаний на примерах классических моделей в механике и управлении.

## О ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ В МАЯТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ДЕФИЦИТЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**Э.К. Лавровский**

*НИИ механики МГУ, Москва*

lavrov@imec.msu.ru

В докладе дается формулировка некоторых задач быстродействия для маятниковых систем. Рассматривается так называемый кинематический подход, при котором управлениями являются обобщенные импульсы, т.е. величины, связанные с первыми производными определяющих координат, а не со вторыми, как обычно. Иными словами, предполагается, что ограничения сверху на истинные управляющие воздействия практически отсутствуют, но они налагаются на обобщенные импульсы.

Исследуется возможности численного метода решения указанных задач. Изучается возможность существования особых и скользящих режимов управления. Возникающий в рамках принципа максимума гамильтониан таких задач является линейно-квадратичным по управлениям. Это обуславливает их специфику. Приводятся графики решений.

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ЗАДАНИЕ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

**Э.К. Лавровский, Е.В. Письменная**

*НИИ механики МГУ, Москва*

lavrov@imec.msu.ru, epismen@yandex.ru

Вдокладе излагаются общие принципы построения системы управления экзоскелетом нижних конечностей, который помогает человеку-оператору осуществить заданный локомоторный цикл. Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата наиболее перспективным являются экзоскелеты, способные не только вертикализировать человека, но и обеспечить ему индивидуальную программу восстановления двигательных функций с паттерном близким к паттерну здорового человека. Синтезированные алгоритмы управления позволяют варьировать длину шага, высоту подъема и скорость переноса ноги. Кроме того, возможно реализовать режимы ходьбы по наклонной плоскости, по лестнице, выполнить переход через различные препятствия.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БПЛА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ

**Д.Ю. Лившиц, И.К. Кузьменко, Р.В. Ермаков**

*АО «КБПА», Саратов*

pbsnik@mail.ru

В настоящей статье предлагается комплексная математическая модель системы автоматической посадки, включающая в себя модель вертолета, модель пилотажно-навигационного комплекса и модель системы автоматической посадки, предназначенная для исследования системы посадки в процессе проектирования. Работа выполнена при поддержке гранта УМНИК 2017.

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОЙ ВСТРЕЧИ С ПРЕСЛЕДОВАТЕЛЕМ, НАВОДЯЩИМСЯ МЕТОДОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

**Э.И. Макиева[1], О.Ю. Черкасов[1]**

[1]*Московский госуниверситет имени М.В.Ломоносова, Москва*

oyuche@yandex.ru

Рассматривается задача встречи материальных точек, движущихся в плоскости. Целью Игрока 1 является минимизация конечного расстояния до Игрока 2, который использует метод пропорционального наведения. Скорости точек постоянны. В качестве управления принят угол между вектором скорости Игрока 1 и линией визирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-08-01366.

## МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ

**А.И. Маликов[1,2]**

[1] *Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанского научного центра РАН, Казань*

[2] *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева -КАИ, Казань*

a_i_malikov@mail.ru

Рассматриваются системы, модели которых представлены дифференциальными уравнениями с локально липшицевыми правыми частями и переменными параметрами. С применением матричных систем сравнения и дифференциальных матричных неравенств разработаны способы эллипсоидального гарантированного оценивания состояния, установлены свойства устойчивости, ограниченности относительно заданных множеств. Решаются задачи подавления начальных отклонений и неопределенных внешних возмущений с помощью обратной связи по состоянию или по выходу. Результаты иллюстрируются на примерах перевернутого маятника и манипулятора с двумя и тремя звеньями с нежестким соединением.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01045 и программы Президиума РАН №30.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ МАТРИЧНЫМИ НЕРАВЕНСТВАМИ ПРИ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.И. Маликов[1], Д.И. Дубакина [2]**

[1] *Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанского научного центра РАН, Казань*

[2] *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева -КАИ, Казань*

a_i_malikov@mail.ru

Для нелинейных систем с неопределенными возмущениями ряд задач анализа динамики, оценивания фазового состояния, синтеза управления могут быть сведены к задачам оптимизации с дифференциальными линейными матричными неравенствами. С использованием итерационных формул разностной аппроксимации производных предлагаются численные способы решения таких задач путем их дискретизации на рассматриваемом интервале и сведения к совокупности взаимосвязанных задач оптимизации в дискретные моменты времени с ограничениями в виде линейных матричных неравенств. Для решения этих задач применяются существующие программные средства полуопределенного программирования. При этом гарантируется выполнение ограничений не только в точках дискретизации но и во всех промежуточных точка рассматриваемого интервала времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01045.

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

**К.А. Мижидон [1]**

[1]*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ*

migka@mail.ru

В докладе рассматриваютсяоптимизационные задачи математического моделирования механических систем, которые могут быть сформулированы в виде некоторых задач управления с фазовыми ограничениями. Приведены все необходимые теоретические обоснования предложенных методов решения задач.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-030004р_а.

## О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**В.М. Морозов, В.И. Каленова**

*НИИ механики МГУ, Москва*

moroz@imec.msu.ru

Предлагается аналитический подход к исследованию некоторых задач управления в космической и авиационной технике, описываемых линейными нестационарными системами определенного класса. Подход основан на приведении этих систем к стационарным системам. Предложенная методика позволила решить ряд задач: управление движением космических аппаратов при помощи сол-

нечного паруса в окрестности коллинеарной точки либрации плоской ограниченной круговой задачи трех тел; стабилизация положений относительного равновесия спутника при помощи магнитных моментов, задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы на поворотном стенде.

## АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ СТРУНОЙ

**А.И. Овсеевич[1], А.К. Федоров[2]**

[1]*Институт проблем механики РАН, Москва*

[2]*Российский квантовый цетр, Москва*

ovseev@ipmnet.ruakf@rqc.ru

Развивается асимптотическая теория управления для одной из простейших распределенных колебательных систем --- замкнутой струны, находящейся под действием ограниченной сосредоточенной силы, приложенной в одной выделенной точке. Определяются классы состояний струны, которые допускают полную остановку под действием такого рода управления, а также находится асимптотически точное значение требуемого времени. На основе использования приближенных областей достижимости вместо точных строится управление типа сухого трения, которое оказывается асимптотически оптимальным по времени. Доказывается существование однозначно определенного движения под действием такого управления. Построение движения в основном производится чисто алгебраическими операциями. Основным результатом является доказательство асимптотической оптимальности построенного управления.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-11-10343.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАТЕРНИОНОВ

**И.А. Панкратов[1,2], Я.Г. Сапунков [2], Ю.Н. Челноков [2]**

[1]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

[2]*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

pankratovia.mechanic@gmail.com

Рассмотрена задача оптимальной переориентации орбиты космического аппарата (КА) под действием реактивной тяги, сообщающей КА ограниченное по модулю ускорение. Минимизируются затраты времени и энергии. Для описания движения центра масс КА использовано кватернионное дифференциальное уравнение ориентации орбиты КА. Построен оригинальный численный алгоритм решения краевой задачи принципа максимума, являющийся комбинацией методов Рунге-Кутта 4-го порядка точности, Ньютона и градиентного спуска. Приведены примеры численного решения задачи. Установлены особенности и закономерности процесса оптимальной переориентации орбиты КА.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00205.

## ОБ ОТСЛЕЖИВАНИИ ТРАЕКТОРИИ КОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С НЕПОЛНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ

**О.А. Перегудова[1]**

[1]*Ульяновский государственный университет, Ульяновск*

peregudovaoa@gmail.com

В докладе представлены результаты решения задачи построения дискретного управления нелинейными нестационарными системами каскадного вида. Доказана теорема о стабилизации движения таких систем на основе применения метода бэкстеппинга путем построения более простого по форме управления в сравнении с классическим подходом. Полученный закон управления применен для отслеживания нестационарной траектории колесного мобильного робота с неполным измерением скоростей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00702а.

## ГРУППОВОЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЕ В ЛИНЕЙНЫХ РЕКУРРЕНТНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИГРАХ

**Н.Н. Петров [1], Н.А. Соловьева [2]**

[1]*Удмуртский государственный университет, Ижевск*

[2]*Умуртский государственный университет, Ижевск*

kma3@list.ru

Рассматривается линейная задача преследования группой преследователей группы убегающих с равными возможностями всех участников и геометрическими ограничениями на управления игроков, при условии, что фундаментальная матрица однородной системы является рекуррентной по Зубову функцией. Получены достаточные условия разрешимости следующих задач: задачи о многократной поимке одного убегающего; задачи о многократной поимке заданного числа убегающих; задачи о поимке хотя бы одного убегающих, при условии, что все убегающие используют одно и тоже управление.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-51-41005.

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБ УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНОГО ПЛАНИРУЮЩЕГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**М.В. Полищук**

*АО «ГНПП «Регион», Москва*

a.mv31@mail.ru

Рассмотрены вопросы системы управления беспилотного планирующего крылатого летательного аппарата (БПК ЛА). Предложена структура системы наведения БПК ЛА на цель. Система наведения в продольном канале, в отличие от используемых в действующих в настоящие время образцах, состоит из двух подсистем, отвечающих за: планирование БПК ЛА на максимальную дальность на первом этапе полета и наведение непосредственно на точку цели на втором, заключительном этапе полета.Как показала практика применения ЛА рассматриваемого типа, вывод в заданную точку на большом удалении от точки старта при отсутствии сигнала спутников, который может быть «заглушен» при помощи средств радиоэлектронной борьбы, может быть затруднен в связи с отсутствием точной информации о местонахождение объекта управления, поэтому для увеличения точности определения собственных координат БПК ЛА предлагается использовать алгоритмы технического зрения.

## УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

**З.Б. Ракишева, Н.Б. Калиева, А.С. Сухенко**

*Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

nazgul.kalieva@gmail.com

В данной статье рассматривается проблема синтеза системы управления ориентацией малых космических аппаратов(МКА) сиспользованием электромагнитных катушек. Гравитационное поле Земли и остаточный магнитный момент рассматриваются как возмущения. Проведены исследования возможности применения ПД-регулятора и теории управления со скользящим режимом для разработки магнитных систем ориентации МКА. А также проведено сравнение эффективности разработанных законов управления по различным параметрам.

Работа выполнена при поддержке гранта РК №AP05132939 «Проектирование системы управления движением группировки спутников для дистанционного зондирования Земли».

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОКОНСЕРВАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

**А.Э. Сагалаков, А.С. Филатьев**

*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*

sag-al@mail.ru

Рассмотрена задача максимизации дальности полета ЛА при фиксированном времени на основе принципа максимума Понтрягина. Предложена регуляризация задачи с помощью упрощенной, псевдоконсервативной, модели движения и введения новых фазовых координат. В рамках такого подхода получены аналитические решения для полного семейства локальных экстремалей. Доказано, что они имеют колебательный характер, нетипичный для традиционно используемых на практике квазистационарных решений. Исследованы оптимальные решения при ограничении на расход массы топлива. Показана хорошая согласованность полученных аналитических решений с результатами численного моделирования на модели без существенных упрощений.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОМ НА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В МНОГОДНЕВНОМ ПОЛЕТЕ

**С.В. Серохвостов[1], Т.Е. Чуркина [2]**

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва*

[2]*Московский Авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

serokhvostov@phystech.edu

Рассматривается задача поиска оптимизации траектории и параметров полета самолета с электрической силовой установкой и возможностью получения энергии от Солнца для случая многодневного полета. Решение получено для случаев полета на постоянной высоте и для полета с возможностью изменения высоты. Получены аналитические выражения для скорости и высоты полета от времени в общем случае зависимостей плотности атмосферы и интенсивности солнечного излучения от высоты и для случая Международной Стандартной Атмосферы. Проанализировано влияние ограничений по высоте полета.

## НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ ГОМАНА

**Б.А. Смольников[1,2], А.С. Смирнов [1,2]**

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

smolnikovba@yandex.ru

Дается новая постановка классической задачи астродинамики – задачи Гомана – об оптимизации двухимпульсного перехода космического летательного аппарата между двумя компланарными круговыми орбитами. В качестве критерия оптимизации принят энерго-временной показатель качества, равный произведению суммарного прироста характеристической скорости на длительность перехода. В результате решения задачи установлена зависимость оптимального значения величины безразмерной начальной скорости от соотношения между радиусами начальной и конечной орбит. Также делается вывод о целесообразности использования энерго-временного критерия и в других задачах орбитальной космической навигации.

## ПОЛИНОМЫ ВОЛЬТЕРРА В ПРИЛОЖЕНИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**С.В. Солодуша**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск*

solodusha@isem.irk.ru

Разработан подход для численного моделирования процесса регулирования нелинейных динамических систем полиномами Вольтерра в случае векторных входных сигналов. В рамках предложенного подхода выполнено тестирование на имитационной модели ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения. Выполнен сравнительный анализ областей применимости интегральных моделей, при построении которых, во-первых, использовались методы идентификации ядер Вольтерра и интегралов от них и, во-вторых, учитывались нестационарные свойства динамической системы.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН, проект № АААА-А17-117030310442-8.

## К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ВХОДА ДЛЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ.

**Н. Н. Субботина [1,2], Е. А. Крупенников[1,2]**

[1]*Институт Математики и Механики УрО РАН им. Н.Н. Красовского, Екатеринбург*

[2]*Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург*

subb@uran.ru ; krupennikov@imm.uran.ru

В докладе рассматриваются задачи динамической реконструкции управлений (входов) для динамических управляемых систем по поступающим в реальном времени дискретным неточным замерам реализуемой траектории (выходам). Предлагается новый подход к решению таких задач, опирающийся на вспомогательные задачи вариационного исчисления на экстремум интегрального выпукло-вогнутого функционала невязки (выпуклого по параметру управления и вогнутого по невязке фазовой траектории). Исследована сходимость предлагаемого метода. Реализация метода проиллюстрирована результатами численного решения задачи динамической реконструкции для модели космического полета.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-01-00074) и Комплексной программой поддержки фундаментальных научных исследований УрО РАН (проект № 18-1-1-10).

## СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АНАЛИЗА НДС ЭЛЕМЕНТОВ ЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

**Тун Мин Лат[1], И. В. Волков [1]**

[1]*Московский физико-технический институт, Москва*

tunminlatt52@gmail.com, volkoviv39@mail.ru

Предлагается создание новых средств неразрушающего контроля, основанных на применении оптических, особенно спекл-голографических методов интерферометрии и расшифровки спекл-голограмм в расчетно-экспериментальном анализе прочности ЛА.

## ИГРОВАЯ ЗАДАЧА О СБЛИЖЕНИИ В ФИКСИРОВАННЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ: СТАБИЛЬНЫЕ МОСТЫ И АППРОКСИМИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ МНОЖЕСТВ

**В.Н. Ушаков[1], В.И. Ухоботов [2], А.В. Ушаков**

[1]*Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского РАН, Екатеринбург*

[2]*Челябинский государственный университет, Челябинск*

ushak@imm.uran.ru

В работе рассматривается конфликтно управляемая система в конечномерном евклидовом пространстве и на конечном промежутке времени, описываемая обыкновенным дифференциальным уравнением. Изучается в рамках позиционного подхода игровая задача о сближении системы с целевым множеством в фиксированный момент времени. Обсуждается центральное в позиционных дифференциальных играх понятие стабильности. Для указанной в докладе системы приведена некоторая модификация определения стабильного моста. Обсуждается также понятие системы множеств, аппроксимирующей максимальный стабильный мост в игровой задаче о сближении.

Работа выполнена при поддержке грантов РФИИ №18-01-00221 и 18-31-00018 мол_а.

## СИНТЕЗ ОБОБЩЕННОГО H∞ - ОПТИМАЛЬНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА НА ТЕЛЕЖКЕ

**А.А. Федюков**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

TeleginSasha@yandex.ru

В работе рассмотрена задача поиска обобщенного $H_\infty$- оптимального регулятора по выходу для перевернутого маятника на тележке. Показано, что решение задачи сводится к разрешимости системы матричных неравенств. В качестве примера построен обобщенный $H_\infty$- оптимальный регулятор первого порядка для изучаемого объекта. Проведено его сравнение с $H_\infty$- оптимальным регулятором.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-41-520002 и №19-01-00289).

## РОБАСТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ФАЗОВУЮ ПЕРЕМЕННУЮ И УПРАВЛЕНИЕ

**А.А. Федюков**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

TeleginSasha@yandex.ru

В работе рассмотрена задача робастной стабилизации по состоянию двухмассовой системы в случае, когда есть ограничение на отклонение одной из масс и ограничение на управление. Подход к решению основан на применении метода функций Ляпунова и аппарата линейных матричных неравенств. Сформулированы достаточные условия для существования регуляторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-41-520002 и №19-01-00289).

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУАЛЬНЫХ КВАТЕРНИОНОВ

**Ю.Н. Челноков**

*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

*ChelnokovYuN@gmail.com*

Разработан в нелинейной динамической постановке с использованием дуальных кватернионов (бикватернионов) новый метод аналитического построения управления пространственным движением твердого тела. Управления обеспечивают асимптотическую устойчивость в целом любого выбранного программного движения и желаемую динамику управляемого движения тела. Использованы новые бикватернионные дифференциальные уравнения возмущенного движения тела, концепция решения обратных задач динамики, принцип управления с обратной связью и приведение указанных уравнений к эталонным линейным стационарным дифференциальным формам выбранной структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00205.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗГОНЯЮЩЕЙ СИЛЫ В ЗАДАЧЕ О БРАХИСТОХРОНЕ

**О.Ю. Черкасов[1], Н.В. Смирнова[1]**

[1]*Московский госуниверситет имени М.В.Ломоносова, Москва*

oyuche@yandex.ru

Рассматривается задача оптимизации движения материальной точки в однородном поле сил тяжести в сопротивляющейся среде. Движение происходит в вертикальной плоскости. Управлениями являются угол наклона траектории и сила тяги. Целью управления является максимизация горизонтальной дальности в заданный момент окончания процесса при наличии штрафа на расход топлива. Максимизация дальности взаимосвязана с задачей о брахистохроне – задачей выбора формы траектории, соединяющей две заданные точки в вертикальной плоскости, время движения по которой будет минимальным. Построен синтез экстремальных управлений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-08-01366.

## СИНТЕЗ КРИТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МАКСИМУМА

**О.В. Янова[1,2], А.С. Филатьев[2], А.А. Голиков[1],**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*

[2]*Московский авиационный институт (МАИ), Москва*

yanova2007@yandex.ru

Представлен метод формирования критических случайных возмущений для динамической системы. На основе минимаксного подхода получен аналитический синтез наихудших сочетаний случайных факторов в предположении малости их влияния на функционал. Метод позволяет строить гарантированные области вероятного разброса результатов, сократив при этом вычислительные затраты на несколько порядков в сравнении с методом Монте-Карло. Преимущества метода показаны на примерах численного решения на основе принципа максимума для ветвящихся процессов задач оптимизации выведения ракет-носителей с ограничением на районы приземления отделяемых частей с учетом атмосферных возмущений.

## ОБ УПРАВЛЕНИИ КОЛЕБАНИЯМИ СТРУНЫ С НЕРАЗДЕЛЕННЫМИ МНОГОТОЧЕЧНЫМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

**В.Р. Барсегян**

*Институт механики НАН Армении, Ереванский государственный университет*

barseghyan@sci.am

Для уравнения колебания струны с заданными начальным, конечным условиями и неразделенными значениями прогиба в промежуточных моментах времени исследуются задачи управления колебаниями и оптимального управления с критерием качества, заданным на весь промежуток времени. Используя методы теории управления и оптимального управления конечномерными системами с неразделенными многоточечными промежуточными условиями построены решения рассматриваемых задач. В качестве приложения предложенного подхода построены функции управления и оптимального управления для колебания струны с заданным нелокальным значением прогиба точек струны в некоторых двух промежуточных моментах времени.

## ПОДСЕКЦИЯ I-3. КОЛЕБАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### УСТОЙЧИВОСТЬ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

**Е.Б. Азаров[1], А.В. Бабкин[1], С.А. Румянцев[1], А.М. Шихов[1]**

[1]*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

EAzarov@usurt.ru

В докладе приводятся результаты исследований динамики вибротранспортных машин с помощью лабораторного вибростенда. Для машин с тремя вибровозбудителями экспериментально установлено явление, которое авторы предлагают назвать «сохраненной самосинхронизацией». Оно позволяет существенно экономить электроэнергию в рабочем цикле машины. В ходе экспериментов, моделирующих технологическую нагрузку, была выявлена устойчивость сохраненной самосинхронизации к технологической нагрузке в весьма широких пределах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00605.

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОГО ЭЛЕРОНА КРЫЛА

**А.В. Анкилов[1], П.А. Вельмисов[2]**

[1,2]*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск*

ankil@ulstu.ru

Исследуется динамическая устойчивость упругого элеронакрыла, взаимодействующего с набегающим с переменной скоростью дозвуковым потоком идеальной жидкости (газа). Определение устойчивости упругого тела соответствует концепции устойчивости динамических систем по Ляпунову. Для отыскания аэрогидродинамической нагрузки используются линейные асимптотические уравнения и методы теории функций комплексного переменного. На основе построения положительно определенного функционала, соответствующего полученному интегро-дифференциальному уравнению с частными производными для функции деформации элерона,получены условия устойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Ульяновской области № 18-41-730015.

### ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНО-ПРОПАШНОГО ТРАКТОРА

**Г.К. Аннакулова[1],Б.Ж. Астанов, С.А. Саидов, А.З. Юсупов**

[1]*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУзим.М.Т. Уразбоева, Ташкент*

annaqulova_g@mail.ru

В статье рассмотрены продольные угловыеколебания через длинную неровность. Определен угол наклона остова трактора при переезде через длинную неровность. Получены совместные колебания передней и задней подвесок трактора, а также угловые колебания с учетом и без учета коэффициентов сопротивления подвесок при различных скоростях движения. Установлено, что при постоянной базе угол наклона остова пропорционален разности перемещений передней и задней подвесок трактора.

Работа выполнена при поддержке гранта АН РУз № МВ-Атех.-2018-94.

### КИНЕМАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ПЛАВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РОТОРНЫХ СИСТЕМАХ

**Л.Я. Банах**

*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва*

banl@inbox.ru

Исследуется кинематика и динамика плавающих элементов роторных систем (уплотнительных колец, втулок подшипников) приихпостоянном контакте сротором. Кольцо «обегает» вокруг ротора в режиме прямой прецессии (типа хула-хуп). Приводится анализ экспериментальных траекторий кольца в кинематическом режиме, а также колебаний системы «ротор - плавающее кольцо» с учетом гидродинамических сил в зазореи контактных сил сухого трения.Показано аналитически, что скорость прецессии кольца близка к его собственной частоте. Движение кольца является прямой асинхронной прецессией, а траектории точек кольца – эпитрохоиды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00-171а.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДВИЖЕНИЯ ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.

**А.Н. Брысин[1,2], Л.Ю. Козлова[2], А.Н. Никифоров[1], В.С. Соловьев[1], А.В. Синев[1]**

[1] Институт Машиноведения им. Благонравова А.А. РАН

[2] -МИРЭА – Российский технологический университет

brysin@mirea.ru , brysin@rambler.ru

Для уменьшения ударных воздействий и резонансных колебаний необходимо значительное увеличение жесткости упругой характеристики при этом демпфирование в зоне статического равновесия должно быть минимальным. Решением этих противоречивых требований и является разработка систем с оптимальным регулированием настраиваемых низкочастотых энергоэффективных систем виброзащиты. В работе рассмотрены вопросы использования системы виброзащиты с инерционными преобразователями в противоударном режиме. Предложен вариант использования ШИМ управления для создания на базе электрической машины дополнительного диссипативного элемента.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ В СИСТЕМЕ ЛОРЕНЦА

**В.М. Буданов**[1]

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

vlbudanov@gmail.com

Представлены результаты аналитического построения периодических решений в системе Лоренца при таких значениях параметров, когда динамический хаос еще не возникает. Эти периодические решения имеют седловой тип, поэтому даже численное их нахождение представляет определенные проблемы. Аналитически построены уравнения первого приближения, исследование которых сведено к решению квадратного уравнения. Получены оценки бифуркационных значений параметров, согласующиеся с результатами известных численных исследований. Построены приближения высших порядков до четвертого, приведено сравнение с численными решениями при больших амплитудах колебаний.

## ПЛЯСКА ПРОВОДОВ ЛЭП – НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПО ЛЯПУНОВУ

**В.И. Ванько**[1], **И.К. Марчевский**[1]

[1]*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

vvanko@mail.ruiliamarchevsky@mail.ru

При изучении пляски токоведущего провода ЛЭП получено достаточное условие неустойчивости по Ляпунову положений равновесия профиля в воздушном потоке (три степени свободы), так же, как и необходимое условие потери аэродинамического демпфирования Глауэрта ─ Ден-Гартога (одна степень свободы), инвариантное относительно механических свойств конструкции. На основе обработки экспериментального материала для плохо- и хорошо обтекаемых профилей убедительно показана адекватность обоих условий.Для расчета аэродинамических нагрузок, действующих на профиль, можно использовать вихревые методы, пригодные также для прямого моделирования в сопряженных задачах взаимодействия элементов конструкций с потоком.

## ПСЕВДОРЕГУЛЯРНАЯ ПРЕЦЕССИЯ АСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

**В.В. Войтик**[1], **Н.Г. Мигранов**[2]

[1]*Башкирский государственный медицинский университет, Уфа*

voytik1@yandex.ru

[2]*Башкирский государственный медицинский университет, Уфа*

ufangm@yandex.ru

Доклад посвящён общей теории псевдорегулярной прецессии неуравновешенного гироскопа. Авторы разлагают эффективную потенциальную энергию, которая зависит от угла отклонения гироскопа от вертикали на член, соответствующий равновесному положению гироскопа и член, квадратично зависящий от поправки к углу нутации. В результате решения уравнений, представляющих собой законы сохранения поправки к регулярной прецессии гироскопа являются высокочастотными малыми гармоническими колебаниями. Представлено общее решение уравнений движения как функция времени. Записано неравенство, являющееся общим условием псевдорегулярной прецессии.

## ЗАВИСИМОСТЬ ВИБРОАКТИВНОСТИ ДВУХПРОЛЕТНОГО РОТОРА С ОСТАТОЧНЫМ ДИСБАЛАНСОМ ПРИ ВЫБЕГЕ ОТ ФОРМЫ КРИВОЙ НЕУСТРАНИМОГО ПРОГИБА

**О.А. Волоховская**

*Институт машиноведения РАН, г. Москва*

OlgaAVol@yandex.ru

В работе для двухпролетного ротора с остаточным дисбалансом и неустранимым прогибом, моделирующего систему «ротор высокого давления - ротор средне-низкого давления» («РВД-РСНД») турбоагрегата, исследована зависимость виброактивности системы от формы кривой прогиба на низших критических скоростях при выбеге.Рассмотрены возможные варианты взаимного расположения остаточных дисбалансов и кривых неустранимого прогиба валопровода для двух видов погнутости - с наибольшим и наименьшим значениями параметра формы. Приведены и проанализированы результаты расчетов амплитуд для системы «РВД - РСНД» турбины К-300-23.5 ЛМЗ.

## РАСЧЕТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК НА БАК С ЖИДКОСТЬЮ И АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРИКРЕПЛЕННОЕ К НЕМУ ОБОРУДОВАНИЕ

**А.Н. Гордеев**[1], **В.С. Модестов**[1], **А.М. Лобачев**

[1] *Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

gordeevan@gmail.com

В данной работе проведено сравнение различных подходов к учету колебаний жидкости в резервуаре – прямое моделирование связанной задачи гидроупругости, моделирование динамики жидкости и использование метода присоединенных масс. Показано, что результаты расчета связанной задачи с помощью Эйлерово-Лагранжевого метода имеют ряд преимуществ перед методом расчёта только средствами механики жидкости. Также показано, что методика присоединенных масс имеет существенно более высокую степень консерватизма, что может быть излишне для расчетов высокой степени точности.

## О КОЛЕБАНИЯХ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ

**М.З. Досаев**

*НИИ механики МГУ, Москва*

dosayev@imec.msu.ru

Рассматривается процесс торможения колеса при его контакте с тормозной колодкой. Податливость колодки в месте контакта ее с колесом моделируется с помощью малого тела-площадки, прикрепленного к колодке посредством пружины. Для моделирования податливости колодки при контакте с толкателем также используется упругая пружина. Показано, что в процессе торможения колодка может совершать колебания относительно переменного положения равновесия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00538.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

**Р.В. Ермаков[1], Д.В. Кондратов[2], А.А. Львов[3], А.А. Серанова[1], Е.Н. Скрипаль[1]**

[1]*АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», Саратов, Россия*

[2]*Поволжский институт управления им. П.А. Столыпина, Саратов, Россия*

[3]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия*

roma-ermakov@yandex.ru

В работе рассматривается модель вибрационной погрешности волнового твердотельного гироскопа и исследуется влияние вибрации на точность прибора. Рассматривается работа волнового твердотельного гироскопа при воздействии на его корпус переносного виброускорения в неосесимметричной постановке. Учет неосесимметричности необходим, так как является основным источником вибрационной погрешности. Задача рассматривается в трёхмерной постановке, что позволяет более детально проанализировать эффекты, вызванные воздействием вибрации в различных плоскостях. Основным результатом работы является построенная модель которая позволяет производить оценку влияния вибраций на показания волнового твердотельного гироскопа на этапе разработки блоков на его основе исходя из сведений о уровне вибраций на целевом объекте.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 9.2108.2017

## ДИНАМИКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА С ДИСКОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

**Е.В. Заворотнева[1], А.В. Лукин[1], И.А. Попов [1]**

[1] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт прикладной математики и механики, кафедра "Механика и процессы управления", Санкт-Петербург*

zavorotneva.ev@gmail.com

В настоящей работе исследуется волновой твердотельный гироскоп с дисковым резонатором. Рассматривается аналитическая постановка задачи о свободных колебаниях плоского диска в отсутствие вращения и при вращении. Реализованы численные методы интегрирования систем дифференциальных уравнений движения диска. Построены графики зависимости собственной частоты резонатораот угловой скорости его основания. Выполнено сравнение собственных частот резонатора, полученных численно и аналитически.

## ОБОБЩЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ ДУФФИНГА В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

**А.И. Землянухин[1], А.В. Бочкарев[1]**

[1]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов*

azemlyanukhin@mail.ru

Проанализировано обобщенное уравнение Дуффинга, содержащее нелинейные члены третьей и пятой степени, возникающее при моделировании волновых и колебательных процессов в трехслойной жидкости и одномерных нелинейно – упругих деформируемых системах. Установлено, что уравнение проходит тест Пенлеве в слабой форме, а его общее решение выражается через эллиптическую функцию Вейерштрасса или ее последовательные вырождения – рациональные функции по экспонентам от независимой переменной или рациональные функции независимой переменной. Проведена классификация точных частных уединенно – волновых и периодических решений, выявлены диапазоны параметров, необходимые для их физической реализуемости.

## СОЗДАНИЕ ЗАДАННОЙ ПЕРЕГРУЗКИ ПРИПОМОЩИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОСТОЯННОЙ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ СИЛОЙПРИ НАЛИЧИИ СИЛ ТЯЖЕСТИ

**А.Н. Зотов[1], М.Д. Иванов[1]**

[1]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

anz21963@yandex.ru

Предложена колебательная система, имеющая силовую характеристику с участком постоянной восстанавливающей силы, для получения заданной перегрузки в земных условиях. В этой системе упругий элемент перемещается по направляющим расчетной формы перпендикулярно их оси симметрии. Возможно использование предлагаемой установки с заданной, контролируемой перегрузкой для тренировки космонавтов. Представлен расчет формы направляющих при присоединении кабинки заданной массы к валам роликов, контактирующих с направляющими. Аналитически определена эквидистантная кривая, определяющая форму направляющих системы с учетом радиуса роликов. Показана возможность изменения постоянной восстанавливающей силы.

## О ВЛИЯНИИ КОРРЕЛИРОВАННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОЛЕБАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ

**Х.П. Культербаев**

*Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик*

kulthp@mail.ru

Рассматриваются поперечные колебания вертикального стержня с массами на верхнем и нижнем концах при двух случайных кинематических воздействиях на фундамент, интерпретируемых как стационарные, стационарно связанные коррелированные случайные процессы. Получены математическая модель колебаний, разработаны алгоритмы решения спектральной задачи и определения среднеквадратического отклонения перемещений, основанные на численном методе конечных разностей. Изучено влияние степени коррелированности компонент векторного случайного процесса возмущений на среднеквадратические отклонения стержня.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

**Л.Р. Лабахуа, Д.А. Маслов, И.В. Меркурьев, В.В. Подалков**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

MerkuryevIV@mpei.ru

Объектом исследования является волновой твердотельный гироскоп, применяемый для навигации и управления движением высокоманевренных транспортных, авиационных и космических систем. В целях повышения точности системы ориентации и навигации построена новая математическая модель резонатора волнового твердотельного гироскопа в виде тонкой упругой оболочки вращения, учитывающая погрешности из-за нелинейных (конечных) колебаний резонатора и неизотропных вязкоупругих свойств конструкционного материала резонатора. В докладе обсуждается методика стендовых испытаний нелинейной системы в целях идентификации параметров математической модели. Приведены результаты экспериментальных исследований динамики гироскопа на подвижном основании.

## КОЛЕБАНИЯ ДВУМЕРНЫХ УПРУГИХ СИСТЕМ С ДВИЖУЩИМИСЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ И ЗАКРЕПЛЕНИЯМИ

**Е.Е. Лисенкова**

*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

*Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС*

EELissen@yandex.ru

Рассматривается самосогласованное динамическое поведение двумерной упругой системы с движущейся распределенной нагрузкой. Найдены выражения через плотность функции Лагранжа для сил волнового давления и сил взаимодействия, обусловленных относительным движением, плотностей потоков энергии и волнового импульса двумерной системы и одномерной нагрузки. Для изгибных колебаний пластины, при учете инерции вращения ее элементов, выявлен диапазон частот, в котором имеет место эффект «обратной волны». Особое внимание уделяется вопросу влияния движения закрепления на энергию колебаний двумерной системы.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-29-10073, №17-08-01096.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОРИОЛИСОВОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА С МЕМБРАННЫМ РЕЗОНАТОРОМ

**А.В. Лукин[1,2], И.А. Попов[1,2], Д.Ю. Скубов[1,2]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

[2]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

lukin_av@spbstu.ru

В настоящей работе выполняется построение математической модели микроэлектромеханического кориолисового вибрационного гироскопа с резонатором в виде круглой мембраны, расположенной симметрично между двумя группами неподвижных электродов (электростатических приводов и датчиков прецессирующей стоячей волны). Принцип действия предлагаемого прибора основан на возбуждении поперечных колебаний мембраны по кососимметричной форме и детектировании её прецессии в системе координат, связанной с подвижным объектом. Показано, что при определенном соотношении между параметрами силовой (пондеромоторной) и геометрической (упругой) нелинейности системы соответствующая форма колебаний является устойчивой и может быть использована в качестве датчика угловой скорости. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00414 А.

## ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**А.О. Мальханов[1], В.И. Ерофеев[1]**

[1]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

alexey.malkhanov@gmail.com

Изучается влияние магнитного поля на формирование локализованной волны в нелинейно-упругой проводящей среде. Получено эволюционное уравнение для описания распространения волнового пучка в среде. Показано, что параметры волнового пучка зависят как от величины внешнего магнитного поля, так и от ориентации поля в пространстве.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-10073, 19-08-00965.

## ФРИКЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ВЯЗКО-СУХОГО ТРЕНИЯ НАСЛЕДСТВЕННОГО ТИПА

**В.С. Метрикин [1], Н.С. Стародубровская[2], И.С. Крутобережская[3], А.А. Ипатов [1]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

[2]*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород*

[3]*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

v.s.metrikin@mail.ru

Рассматривается динамика осциллятора, представляющего собой пару трущихся поверхностей, одна из которых движется с постоянной скоростью, а другая, прикрепленная к неподвижной опоре, находится на ней. Показано, что режимы с относительным покоем трущихся поверхностей возможны лишь при значениях коэффициента вязкого трения, принадлежащих определенному интервалу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

## ДИНАМИКАВИБРОУДАРНЫХМЕХАНИЗМОВ ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГРУНТОВ

**В.С. Метрикин[1], И.В. Никифорова[2]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

[2] *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

tsii@list.ru

В работе приводится модель вибрационного механизма, представляющая собой существенно-нелинейную динамическую систему и дискретная модельобрабатываемой среды. Приводится структура фазового пространства системы, в котором с помощью математического аппарата метода точечных отображений отыскиваются различные типы движений механизма в зависимости от параметров системы. Приводятся конкретные расчеты различных типов периодических и хаотических движений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

## ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ

**В.И. Миронов[1], Д.А. Огорелков[1,2,a], О.А. Лукашук[2]**

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

[2]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

[a]ogorelkov.dimon@yandex.ru

Разработка новых моделей циклической деградации материала и практических способов повышения долговечности составляют два взаимосвязанных направления в решении актуальной проблемы усталости металлических конструкций. В докладе приводится модельная и экспериментальная оценка эффективности конструкционного демпфирования металлической конструкции легким энергоемким материалом. Расчет долговечности выполнен по авторской методике на основе модели циклической деградации материала и по правилу линейного суммирования усталостных повреждений. Прогнозируется значительный рост долговечности балочной конструкции с уменьшением толщины стенки поперечного сечения.

## ПРИМЕНЕНИЕ УТОЧНЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

**Н.И. Молодушная[1]**

[1]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

united-friends@bk.ru

В работе исследована задача о поперечных колебаниях составной струны, которая сводится к задаче об изгибных колебаниях эквивалентного стержня модели Тимошенко с натяжением. Показано, что составная мембрана эквивалентна пластине Тимошенко с натягом. Исследована задача о поперечных колебаниях составной мембраны с учетом геометрической нелинейности, получены и исследованы одномерные и двумерные солитоны, а также представлены различные формы нелинейных периодических колебаний.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00965А.

## КЛАССИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА КАПИЦЫ И ЕЕ ОБОБЩЕНИЯ

**Н.Ф. Морозов [1], А.К. Беляев [2], П.Е. Товстик [1], Т.П. Товстик [2]**

[1]*Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург*

[2]*Институт Проблем Машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

peter.tovstik@mail.ru

Рассматривается классическая задача Капицы об устойчивости перевернутого маятника под действием вибраций опоры и ее обобщение на случай гибкого стержня. Приводятся условия устойчивости шарнирно и упруго закрепленного маятника. Исследуется динамика вертикального стержня со свободным верхним концом и жестко или шарнирно закрепленным нижним концом. Стержень находится под действием собственного веса и гармонических вибраций опоры. Приводятся условия устойчивости вертикального положения стержня. Обсуждается вопрос об области притяжения вертикального положения. Построена область притяжения для маятника Капицы и для упруго закрепленного маятника, моделирующего упруго закрепленный стержень. Найдена область устойчивости и область притяжения в случае, когда опора совершает случайные колебания.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16.01.00580-а, 16.51.52025 МНТ-а.

## ДИНАМИКА НЕОДНОРОДНОГО ШАРА НА ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

**А.И. Муницын**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

munitsyn@rambler.ru

Рассматривается задача о вынужденных колебаниях тяжелого неоднородного шара на горизонтальном основании. Предполагается, что основание движется по гармоническому закону в горизонтальном направлении, а в точке контакта между поверхностью тела и основанием действуют сила и момент трения. Выведены уравнения движения механической системы для различных моделей трения. Построены зависимости амплитуд колебаний для частот возбуждения близких к собственной частоте колебаний неоднородного шара на абсолютно гладком основании. Обнаружены как плоские, так и пространственные режимы колебаний.

## РАСЧЕТ ДВУХАМПУЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЛНОВОДА

**А.А. Мухаметгалина[1], А.А. Назаров[1,2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

a.mukhametgalina@mail.ru

Для объемной ультразвуковой обработки (УЗО) материалов обычно используются цилиндрические полуволновые образцы или волноводы, амплитуда напряжений вдоль которых меняется по синусоидальному закону. При такой обработке структура и свойства материала под действием УЗО меняются неравномерно вдоль образца.В данной работе предложена схема инструмента для УЗО с увеличенной зоной постоянной амплитуды напряжений, основанная на ампульном волноводе.Рассчитаны геометрические параметры такого волновода, с помощью конечно-элементного моделирования проведены модальный и гармонический анализы, подтверждающие результаты теоретического расчета.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10126.

## ОБ ОДНОСТОРОННЕМ ПРИТЯЖЕНИИ НАМАГНИЧЕННОГО РОТОРА

**А.Н. Никифоров**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

n.andre@mail.ru

В работе представлен подход к определению силы одностороннего магнитного притяжения, воздействующей на ротор в электромеханических машинах. Получены два выражения – нелинейное и линейное приближения, в т.ч. введено понятие магнитной отрицательной жесткости. Определения содержат минимум входных параметров магнитной цепи; а именно число полюсов, магнитные индукцию и поток в зазоре.

Работа выполнена при поддержкеРФФИ, проект № 18-08-00171.

## ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ВИБРОМЕТРИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**С.М. Николаев[1], И.К. Ужинский[1]**

[1]*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

s.nikolaev@skoltech.ru

Работа посвящена методунеразрушающего контроля деталей из композиционных материалов с помощью лазерной виброметрии. Контроль вибраций выполняются с помощью сканирующего лазерного виброметра, принцип которого основан на эффекте Доплера. Прибор фиксирует вибрационный отклик на заданное динамическое воздействие в диапазоне частот от 0 до нескольких кГц, выполняя непрерывные измерения вибрации в процессе скольжения луча по поверхности детали. Для идентификации дефектов в детали применяется комбинация методов экспериментального модального анализа и вейвлет-преобразования.

## VIBRATION OF A MICROELECTROMECHANICAL RESONATOR OF THE PLATFORM TYPE WITH NONLINEAR MATERIALS

**Daulet Nurakhmetov [1], Piotr Skrzypacz [2], Dongming Wei [3]**

[1,2,3]*Nazarbayev University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

dauletkaznu@gmail.com

We study the vibrations of a microelectromechanical resonator of the platform type made of nonlinear materials. The design of such micro-resonator was proposed by E.G. Kostsov and S.I. Fadeev. In contrast to their works, we considerin our model the micro-cantilever beam made of a power-lawmaterial. The sufficient conditions for the existence of periodic solutions to the lumped model equation are proved analytically and verified numerically by ODE solvers.The work was supported by the Nazarbayev University ORAU grant “Modeling and Simulation of Nonlinear Material Structures for Mechanical Pressure Sensing and Actuation Applications”.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

**Л.Р. Нуратуллина[1], В.П. Павлов[2]**

[1,2] *Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

mardliliya@yandex.ru

В работе рассматриваются собственные поперечные колебания стержня с поперечным сечением прямоугольной формы, имеющим постоянную высоту и переменную ширину, изменяющуюся по экспоненциальному закону. Аналитическим методом получены значения частот собственных колебаний при различных функциях изменения поперечного сечения стержня и различных способах его закрепления.

## ПРОБЛЕМЫ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ ВБЛИЗИ ЗОН РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

gpanovko@yandex.ru

Исследуется стабильность синхронных режимов вращения двух дебалансных вибровозбудителей, вращающихся в противоположных направлениях, установленных на несущем теле колебательной системы, находящейся в гравитационном поле. Основное внимание уделяется исследованию стабильности синхронизации вибровозбудителей при колебаниях системы вблизи резонансных областей частот. Обсуждаются результаты испытаний рассматриваемых систем.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ(проект № 18-19-00708).

## О НЕКОТОРЫХ ТИПИЧНЫХ ПОВЕДЕНИЯХ ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАЦЕПЛЕНИЯМИ САТЕЛЛИТА

**А.В. Паншина[1], К.Б. Обносов[1], Н.И. Бондаренко[1]**

[1]Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва

an.pan.2019@mail.ru

В работе рассматривается механизм планетарного типас одной степенью свободы,который может являться неотъемлемой частью планетарных редукторов, бортовых планетарных передач сельскохозяйственной техники.Возможные движения механизма исследуются с помощью анализа потенциальной энергии. Сравнивается движение механизма при внутреннем и внешнем зацеплениях сателлита со сходными значениями параметров. Изучается вопрос бифуркации его колебаний. Цельюработы является исследование и демонстрация особенностей поведения и изменения потенциальнойэнергии механизма планетарного типа при варьировании некоторыхего характерных параметров.

## О НЕКОТОРЫХ СХЕМАХ АНАЛИЗА ВЯЗКОУПРУГИХ СИСТЕМ

**И.Е. Полосков[1], C.Soize[2]**

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

[2]*Université Paris-Est Marne-la-Vallée* (*UPEM*), *Marne-la-Vallée, France*

[1]polosk@psu.ru[2]christian.soize@u-pem.fr

Доклад посвящен формулировке вычислительной схемы для анализа во временной области линейных вязкоупругих систем, описываемых стохастическими интегро-дифференциальными уравнениями со стационарными и нестационарными случайными шумами на входе, при наличии или отсутствии случайных неопределенностей, моделируемых на основе теоретико-вероятностного подхода. Затем представляются теоретический аппарат и алгоритмическая часть применения матричных функций Грина для исследования таких систем и демонстрируетсяприменениевычислительной схемы на примере расчета статистических характеристик термовязкоупругой системы. Кроме основных, рассматривается ряд дополнительных форм моделей и методы их анализа.

## ТОРМОЖЕНИЕ ОПЕРЕННОГО ТЕЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЦЕНТРА МАСС ВДОЛЬ ОСИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

**О.Г. Привалова,Ю.М. Окунев, В.А. Самсонов**

*НИИ механики МГУ, Москва*

privalova@imec.msu.ru

Вработеисследуетсяторможение динамическисимметричногооперенноготелав невозмущенной атмосферев случае, когда скорость центра масс направлена по оси динамической симметрии тела. Изучаются закономерности изменения угловой скорости объекта и скорости центра масс. Показывается, что аэродинамические силы, действующие на тело, могут носить как диссипативный, так и антидиссипативный характер. Исследуется зависимость характера диссипации от угла установки лопастей на теле, от их формы и распределения масс тела.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00538.

## ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМАХ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Е.Н. Рыжов[1], А.С. Горобцов[1], О.Е. Григорьева[1]**

[1]*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

rzhvt@mail.ru

В докладе представлены принципы построения иерархических структур в теории нелинейных колебаний. Рассмотрены основные задачи, решаемые введением подобных структур. Подход к построению систем подобного вида основывается на задании структур в виде ориентированных графов, со взвешенными ребрами, определяющих пропускную способность каналов передачи параметров возбуждения автоколебаний от одной подсистемы к другой. Подход к решению задач основан на синтезе изолированных инвариантных кривых в фазовых подпространствах соответствующих подсистем с последующей стабилизацией движений в окрестности этих кривых. Результаты исследования проиллюстрированы численным моделированием.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И ИЗМЕНЕНИЯ ВИБРОСОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

**И.Н. Сидоров, В.И. Савинов, Д.А. Булашов, В.В. Туктарова**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Казань*

sidorovin@mail.ru

Представлены описания математических моделей и программных средств для расчетного анализа динамических характеристик связанной многоопорной роторной системы (РС), позволяющих: рассчитывать параметры вынужденных колебаний многоопорной РС; динамические характеристикиэллиптических и сегментных подшипников скольжения; идентифицировать динамические характеристики опор; проводить балансировку РС одновременно для нескольких частот вращения**.**

## МОДЕЛИРОВАНИЕПЛЯСКИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП СОВМЕСТНО С УСТОРОЙСТВАМИ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ

**И.И. Сергей[1], А.А. Виноградов[2], А.Н. Данилин[2], В.И. Кирюхин[3]**

[1]*Белорусский национальный технический университет, Минск, Белоруссия*

[2]*Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия*

[3]*Тульский Арматурно-изоляторный Завод, Тула, Россия*

andanilin@yandex.ru

В работе исследуются нелинейная динамика проводов воздушных линий электропередачи совместно с устройствами гашения колебаний. Рассматриваются задачи о галопировании проводов в условиях обледенения. В результате численных экспериментов показаны способы демпфирования и рассогласования связанных изгибно-крутильных колебаний с помощью гасителей пляски маятникового типа. Рассмотрены различные схемы установки гасителей маятникового типа для наиболее эффективного гашения низкочастотных колебаний, возникающих при пляске. Проанализирована эффективность применения маятникового гасителя торсионно-демпферного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП Министерства образования и науки (Соглашение № 14.604.21.0188, ID RFMEFI60417X0188).

## ЦИКЛЫ В ВОЗМУЩЕННОЙ КОНСЕРВАТИВНОЙ СИСТЕМЕ

**В.Н. Тхай**

*Институт проблем управления РАН, Москва*

tkhaivn@yandex.ru

Рассматривается консервативная система, допускающая семейство периодических движений. Находится нелинейная сила, под действием которой в возмущенной системе близ выделенного колебания рождается цикл; дается анализ рассеяния полной механической энергии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00146.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА КАЧЕЛЯХ

**А.М. Формальский, Л.А. Климина**

*НИИ механики МГУ, Москва*

formal@imec.msu.ru

Моделируются движения человека, сидящего на качелях. Механическая модель качелей с человеком на них представляет собой двухзвенный шарнирный механизм. Первое звено моделирует корпус человека вместе с двумя бедрами, второе – голени. Межзвенный шарнир моделирует коленные суставы. Угол поворота второго звена (голеней) может изменяться в некоторых заданных пределах. Учитывается момент сил вязкого трения в точке подвеса качелей. В межзвенном шарнире прикладывается ограниченный по абсолютной величине управляющий момент. Построено в виде обратной связи управление, позволяющее раскачать (либо затормозить) качели и «выйти» на установившийся режим колебаний с постоянной амплитудой.

## ROLLING A HEAVY BALL OVER THE CURVE COORDINATE SURFACES OF ORTHOGONAL CURVILINEAR COORDINATE SYSTEMS

In Memory of scientists and academician RAS V.V. Rumyantsev and V.M. Matrosov

**K. R. (Stevanović) Hedrih [1,2]**

[1]*Mathematical Institute of Serbian Academy of Science and Arts, Belgrade, Serbia*

[2]*Faculty of Mechanical Engineering at University of Niš, Niš, Serbia*

katicah@mi.sanu.ac.rs, khedrih@sbb.rs, khedrih@eunet.rs, katica@masfak.ni.ac.rs

In the last author's paper rolling heavy ball over the sphere surface is described in curvilinear sphere coordinates using meridian and circular angle coordinates. Rolling of ball is decomposed into two components of the rolling, one along meridians and second along comparators of the spherical curvilinear coordinate lines. Investigation shown that constraints are pure geometrical and stationary, and that system is holonomic and scleronomic. In this paper, on the basis of previous results, a natural approach for investigation rolling ball over the curved coordinate surfaces and corresponding parallel surfaces in different orthogonal curvilinear coordinate system is presented. Rolling ball motion is decomposed, into two components of rolling along orthogonal coordinate lines of the curved coordinate surface.

## ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ШТОРМОВОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК

**П.А. Хазов[1], Е.А. Никитина[2]**

[1]*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород*

[2]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

khazov.nngasu@mail.ru

Показано, что при действии расчетных ветровых нагрузок, определенных согласно действующим нормативным документам, не происходит деградации свойств материала несущих конструкций и ресурс здания является условно-неисчерпаемым. При воздействии реальных ветровых нагрузок, имеющих динамическую природу, происходит увеличение механических напряжений, связанное с непостоянной скоростью потока (штормовые явления) и с резонансными эффектами. Подобная картина наблюдается и при сейсмических воздействиях. Приводятся рекомендации по обязательной динамической паспортизации ответственных зданий не только после землетрясений, но и после длительных штормовых воздействий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00715.

## РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО ПЬЕЗОДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Б.Ф. Шорр, А.Д. Бортников**

*Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва*

bortnikovad@gmail.com

Численным моделированием методом волновых конечных элементов исследованы особенности взаимодействия механической системы с пьезоэлементами при нестационарных продольных колебаниях стержня при проходе через резонансную область. На примере расчета и экспериментального исследования колебаний полноразмерной лопатки компрессора авиационного двигателя показана эффективность активного гашения вынужденных изгибных колебаний с помощью пары пьезоэлементов – сенсора и актуатора, соединенных электрической цепью с усилителем. Продемонстрирована возможность увеличения резонансных напряжений в режиме «антигашения» колебаний путем управления сдвигом фаз колебаний пьезоэлементов.

## СПЕКТР ЧАСТОТ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА НА УПРУГИХ ОПОРАХ С ДВИЖУЩЕЙСЯ ЖИДКОСТЬЮ

**А.А. Юлмухаметов, А.Г. Хакимов**

*Институт механики им.Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

artyr_yulmuhametov@mail.ru

Исследованы собственные изгибные колебания трубопровода на упругих опорах с движущейся жидкостью под давлением. Предполагается, что вдоль нейтральной линии действует постоянная продольная сила. Учитывается влияние внутреннего давления в трубе на эти колебания. Принимается, что части трубопровода по обе стороны от провисающего участка имеют упругие опоры.

Решена прямая задача определения собственных частот изгибных колебаний трубопровода по модели Кирхгоффа. Определяется спектр частот в зависимости от давления жидкости, упругости опор, скорости течения жидкости по трубе.
Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (№0246-2019-0088) игрантом РФФИ (№18-01-00150).

## О ПОГРЕШНОСТИ АНАЛИЗА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗАДАЧАХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ НАНОБАЛОК С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

**Т.В. Яковлева[1], В.С. Кружилин[1], В.А. Крысько-мл.[1]**
[1]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов*
yan-tan1987@mail.ru

Нанобалки являются составными элементами МЭМС и НЭМС и имеют широкое практическое применение в гироскопах, измерительных приборах, где подвергаются внешним воздействиям различного рода. Поэтому важным и актуальным вопросом является исследование особенностей частотных характеристик их колебаний. В работе построена математическая модель нанобалки Эйлера-Бернулли на базе модифицированной моментной теории. На нанобалку действует внешняя поперечная нагрузка. Поставленная задача решается методами конечных разностей второго порядка и методами типа Рунге-Кутты. Показано, что Фурье анализ приводит к погрешностям.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-38-00878 мол_а.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТОРОВ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

**С.Н. Гаврилов[1], Ю.К. Петреня[2]**
[1]*ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург*
[2]*ПАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург*
s.n.gavrilov@mail.ru

Рассмотрены проблемные вопросы определения вибрационных характеристик статоров мощных турбогенераторов. Для повышения достоверности численного моделирования необходим учёт в расчётных процедурах экспериментальных данных стендовых исследований и промышленных экспериментов. Предложена расчетно-экспериментальная методика определения вибрационных характеристик на базе метода конечных элементов в трехмерной постановке, особое внимание уделено этапу формирования граничных условий с учетом данных экспериментальных исследований. Приведены результаты сравнение расчетного и экспериментального спектра собственных частот.

## Подсекция I-4. МЕХАНИКА СИСТЕМ ТВЕРДЫХ И ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Д.Г. Агапов**

*Брянский государственный технический университет, Брянск*

dagapov@umlab.ru

В работе показана возможность применения метода дискретных элементов (МДЭ) для моделирования динамики колеса автомобиля. Рассмотрена модель колеса автомобиля, состоящая из набора абсолютно-твёрдых тел, связанных между собой упруго-диссипативными элементами. Взаимодействие колеса с дорогой моделируется с учётом остаточной просадки грунта. Модель реализована в виде подсистемы специального типа в программном комплексе «Универсальный механизм», который является одним из лидеров коммерческого программного обеспечения в области моделирования динамики систем тел. Показана работа модели в различных режимах движения автомобиля. Приведено сравнение результатов расчётов рассматриваемой модели колеса с моделью, созданной с использованием метода конечных элементов, а так же с моделью FTire.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-320004.

### ВОСЕМЬ ВИДОВ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЯХВ УПРУГИХ ТЕЛАХ

**Ю.А. Алюшин**

*Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва*

alyushin7@gmail.com

**А**нализлокальных составляющих энергии для продольных, поперечных и крутильных колебаний выполнен на основе энергетической модели механики.Структура кинематических инвариантов, ассоциируемых с энергией, позволяет выделить 8 видов энергии. По аналогии с изменением геометрической структуры тела при свободных колебаниях без притока энергии через внешние границы, возможны изменения в микрообъемах, происходящие за счет внутренних источников без обмена энергией с соседними частицами. Результаты, в дополнение к известным для абсолютно твердых и деформируемых тел, можно рассматривать как дополнительные аргументы правомерности применения энергетической модели для решения различных задач механики.

### МЕХАНИКА НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЙ ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И ЭНЕРГИЯ

**Ю.А. Алюшин**

*Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва*

alyushin7@gmail.com

Предложена новая концепция механики на основе понятий пространство, время и энергия, которая представлена в виде суммы произведений инвариантов уравнений движения и скаляров, характеризующих физические свойства материала. Из условия независимости энергии от выбора системы отсчета скоростей получены дифференциальные уравнения движения, соотношения между напряжениями и деформациями. Показана возможность перехода к новому началу отсчета средних напряжений с учетом объемной плотности энергии частиц в исходном состоянии и одной константе для упругой деформации. Рассмотрены энергетические особенности свободных колебаний, резонансаи механизмы перехода от обратимых деформаций к необратимым.

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИДОВ И ПАРАМЕТРОВ ЗАКРЕПЛЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.М. Ахтямов**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

*Башкирский государственный университет, Уфа*

AkhtyamovAM@mail.ru

Показано, что по собственным частотам колебаний механических систем (струн, стержней, пластин, трубопроводов, пластин и оболочек) можно однозначно восстановить как параметры закрепления, так и его вид.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-51-06002-Аз_а, 18-01-00250-а, 17-41-020230-р_а, 17-41-020195-р_а.

### РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТРЕНИЯ В КОНТАКТЕ ЭЛАСТИЧНОГО КОЛЕСА С ТВЕРДОЙ ПЛОСКОЙ ОПОРОЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

**Е.В. Балакина, Д.С. Сарбаев, И.В. Сергиенко**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

fahrgestell2011@yandex.ru

В данной статье идет речь о моделировании трения в пятне контакта эластичного колеса транспортного средства, движущегося по твердому плоскому основанию, при комбинированном нагружении. Приведены результаты исследований по определению долей влияния разных факторов на величину трения в контакте колеса с опорой. Ранжирование проводилось на основании собственных результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также на основании некоторых литературных источников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00011.

## ДИСКРЕТНАЯ И КОНТИНУАЛЬНАЯ АНАЛОГИЯ В РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

**А.К. Беляев**

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

vice.ipme@gmail.com

Предлагается описание, учитывающее неоднородность сложных систем и недостаточность статистической информации о геометрических и механических параметрах материалов в рамках одного и того же подхода. Подход основан на представлении системы в виде огромного количества подструктур с недостоверными механическими и геометрическими параметрами. Для случая высокой плотности собственных частот подструктур получены аналитические выражения для усредненной спектральной плотности энергии подструктуры. Установлены уравнения, описывающие передачу высокочастотной вибрационной энергии от подструктуры к подструктуре. Показано, что поток вибрационной энергии в сложных системах и ее перераспределение между подструктурами подчиняется уравнению, являющимся механическим аналогом дискретной формы обобщенного закона Фурье в теплопроводности. Проведено обобщение подхода на континуальный случай и получена граничная задача типа теплопроводности. Обсужден вопрос о роли энтропии в задачах распространения высокочастотной вибрации в сложных системах.

## ФОНТАНИРУЮЩАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ЦЕПОЧКА

**А.К. Беляев[1], А.А. Суханов[2], А.И. Цветков[2]**

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

alexeevich2012@gmail.com

Рассматривается задача падения металлической цепочки из стакана, расположенного на некоторой высоте над полом. При этом цепочка не перекатывается через край стакана, а устремляется сначала вверх, образуя высокую петлю металлического фонтана. Величина подъема металлической цепочки над стаканом оказывается пропорциональной перепаду высот между стаканом и полом. Для объяснения этого парадоксального эффекта была разработана математическая модель движения цепочки, позволившая не только разобраться в необычном явлении, но и получить количественные оценки параметров металлического фонтана, хорошо согласующиеся с натурными экспериментами.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ EULER

**В.Г. Бойков**

*ООО «АвтоМеханика», Москва*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

boykov@euler.ru

Представлен обзор основных возможностей отечественного программного комплексаавтоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER (ЭЙЛЕР). Программный комплекс EULER предназначен для анализа работы механических систем, включающих сложную кинематику, большие движения, жесткие и деформируемые элементы конструкции, гидравлические, пневматические и электрические системы, системы управления и другие компоненты. Он реально используется для решения широкого класса задач в самых различных областях техники.

## ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА EULERB РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**В.Г. Бойков, Ф.Р. Файзуллин**

*ООО Автомеханика, Москва*

boykov@euler.ru

Представлен программный комплекс EULER, предназначенный для автоматизированного анализа динамики систем твердых и упругих тел (flexiblemultibodydynamics). Описываются практические приложения теории движения системы твердых и упругих тел. Демонстрируются работа в программном комплексе и результаты решения практических задач. Приводятся примеры из различных областей техники: авиационной, космической, автомобильной, оборонной и др.

## ИНТРОСПЕКЦИЯ СЛОЖНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ МАТРИЧНОЙ МЕХАНИКИ

**В.В. Величенко**

*Институт машиноведения РАН, Москва*

vlad.velichenko@mail.ru

Предложен метод неразрушающего мониторинга внутреннего состояния сложных и протяженных конструкций инструментами матричной механики.

## МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ КОМПЛАНАРНОСТИ ПЛАНЕТНЫХ ОРБИТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**В.В. Величенко, В.П. Тарасова**

*Институт машиноведения РАН, Москва*

vlad.velichenko@mail.ru

Обсуждаются первые метафизические обоснования плоской формы Солнечной системы, предложенные Ньютоном и Мопертюи, и последующие физические объяснения этого феномена современными теориями. Показано, что традиционное предположение о первоначальном кинетическом моменте строительного материала Солнечной системы лишнее, и планетные системы всех звезд с течением времени выстраиваются в одной плоскости под действием сил гравитации.

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ПРИКРЕПЛЕННЫХ К БАЛКЕ ЭЙЛЕРА-БЕРНУЛЛИ, ОСНОВАННОЕ НА ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**В.В. Гармаева**

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ*

gfiksiv@gmail.com

Статья посвящена алгоритмическому сопровождению исследования свободных колебаний балки Эйлера-Бернулли с упруго-прикрепленной системой взаимосвязанных твердых тел. Рассматривается обобщенная математическая модель, представленная в виде гибридной системы дифференциальных уравнений, состоящей из обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных. Постановка задачи рассматривалась в ряде работ научного коллектива под руководством А.Д. Мижидона. Метод исследования реализован на языке C#.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-41-030004 р_а, гранта «Молодые ученые ВСГУТУ»

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАТОПРОТЕЗА ИМПЛАНТИРОВАННОГО В РОГОВИЦУ ГЛАЗА

**Н.И. Глушко, А.Н. Соловьев**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

leksa_n@list.ru

Эффективной процедурой для восстановления зрения является операция по внедрению имплантатов в роговицу глаза. Такой кератопротез является фрагментом искусственной роговицы, представляющий собой «заглушку» с цилиндрическим основанием. В работе рассмотрены две постановки задачи: в первом случае рассматривается круглая пластина, с неоднородными упругими свойствами по радиусу. Во втором случае система имплантат-роговица представляет собой составную сферическую оболочку и круговую пластину. Построены аналитическое решение и конечноэлементные модели, на основе которых проведена серия численных экспериментов, определено напряженно-деформированное состояние роговицы и промежуточного слоя между роговицей и оптическом протезом.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №14.Z50.31.0046

## ГИДРОДИНАМИКА И ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОЙ БУКСИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ МОРСКОГО ДНА

**В.Т. Грумондз[1], Р.В.Пильгунов[1,2], М.В.Виноградов[2]**

*[1]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва,*
*[2]АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Москва*

V.grumondz@gmail.com

Рассматривается гидродинамика и динамика пространственного движения подводной буксируемой робототехнической системы, предназначенной для мониторинга заданной области морского дна. Представлены гидродинамические характеристики буксируемого тела. Построены математические модели продольного и бокового движений буксируемого тела. Проанализированы возможные установившиеся движения системы. Рассмотрены задачи динамики продольного движения в режиме отслеживания рельефа морского дна и обхода подводных препятствий, а также бокового движения в режиме установившейся горизонтальной циркуляции. Получены условия устойчивости продольного и бокового движений буксируемого тела.

## СИЛЫ РЕАКЦИИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С РАЗВАЛОМ

**Г.В. Гусак**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

g_gusak@mail.ru

Рассматривается задача о статическомнагружении системы двух колес с деформируемой периферией, закрепленных на общей оси с ненулевым углом развала. Протекторы колес моделируются множеством упругих стержней, взаимодействующих с плоскостью по закону сухого трения. Изучается влияние развала в колесной паре на проскальзывание в зоне контакта и величину реакций со сто-

роны дороги. Рассмотрен аналог непрерывной модели стержневого протектора, найдены величины нормальных и касательных реакций в зависимости от вертикального перемещения центра системы.

## НОВАЯ ФОРМА УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО ГИРОСТАТА

**Г.В. Горр[1], А.А. Илюхин[2]**

[1]*Институт прикладной математики и механики, Донецк*

[2]*Таганрогский институт имени А. П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)», Таганрог*

gvgorr@gmail.com, aleilyukhin@yandex.ru

В докладе рассматривается задачао редукции уравнений движения тяжелого гиростата с неподвижной точкой. Поскольку в проблемах понижения порядка уравнений важное значение имеют особые решения – решения, на которых зависимы первые интегралы, в первой части доклада излагаются результаты обособы решениях. Во второй части доклада рассматривается новая форма уравнений движения тяжелого гиростата. Указана роль новой переменной, при нулевом значении которой возникают особые решения.

## МЕХАНИКА КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО КАРКАСА КОЛЬЦЕВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

**В.Н. Зимин, А.В. Крылов, С.А. Чурилин**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

zimin@bmstu.ru

Развитие космической техники ставит задачи создания принципиально новых крупногабаритных космических конструкций. При развертывании трансформируемых крупногабаритных конструкций не должно быть значительных ударных нагрузок в соединениях; процесс раскрытия должен быть «упорядоченным», чтобы избежать соударений элементов конструкций между собой и с элементами систем, доставляющих такие конструкции на орбиту. Для исследования динамики раскрытия трансформируемой конструкции используется программный комплекс MSC.Adams. Для анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и оценки её работоспособности используется программный комплекс MSC.Patran/Nastran.

## АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ СПУТНИКА С НЕЖЕСТКИМИ КРУПНОГАБАРИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Д.С. Иванов[1], М.Ю. Овчинников[1], С.С. Ткачев[1], А.И. Шестопёров[1]**

[1]*Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН, Москва*

*Stevens_L@mail.ru*

В работе рассматривается задача управления ориентацией космического аппарата с двумя крупногабаритными элементами, один из которых закреплен на одностепенном шарнире. Полагается, что средства управления и определения движения располагаются только на корпусе аппарата. Задача состоит в стабилизации аппарата в заданном положении и успокоение колебаний нежестких элементов. Управления строится на основе линейно-квадратичного управления, для определения движения используется фильтр Калмана.

## МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ КОНФОРМАЦИЙ МОЛЕКУЛ ДНК

**А.А. Илюхин[1], Д.В. Тимошенко[2]**

[1]*Таганрогский институт имени А. П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)», Таганрог*

[2]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

dmitrytim@yandex.ru, aleilyukhin@yandex.ru

Рассматривается концептуальный подход к задаче управления поведением молекул ДНК и их структурой. Работа носит проблемный характер и является обобщением исследований авторов в области моделирования поведения методами механики деформируемого твердого тела. Предметом исследований в настоящей работе служит вопрос и применимости методов теории управления к объекту живой природы. В работе рассматриваются как вопросы управляемости на примерах влияния параметров молекулы на ее конфигурацию, так и вопросы наблюдаемости и идентификации параметров молекулы, исходя из видимой конфигурации в естественной среде. Предлагаемый подход согласуется с современными тенденциями в области молекулярного моделирования в биофизике и физико-химической биологии и представляется перспективным в решении задач управления генетическими и биохимическими процессами с участием ДНК.

## ГРУППОВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ПЛАНИРУЮЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Е.И. Карпежников**

*АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Москва*

Karpezhnikov@rambler.ru

Рассматривается задача разработки алгоритма применения группы планирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Дана постановка задачи максимизации дальности полета группы, с учетом ограничения на запас полной механической энергии. Построен алгоритм формирования траектории с заданными условиями на концах траектории.

## О КОНФИГУРАЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ ШАРНИРНЫХ МЕХАНИЗМОВ И ИХ ПРОЕКЦИЯХ

**М.Д. Ковалёв**

*Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Москва*

mdkovalev@mtu-net.ru

Рассматриваются идеальные плоские шарнирно-рычажные механизмы,в которых каждый свободный шарнир движется по кривой. Строятся экзотические примеры: механизм, обладающий в разных своих положениях разным числом степеней свободы, механизм с числом степеней свободы большим единицы в любом его положении. Эти явления связаны с наличием замерающих шарниров. Разобраться с ними возможно лишь на основе математической формализации основных понятий теории механизмов. Уточнение понятий приводит к ряду новых вопросов. Один из них: существуют ли плоские шарнирные механизмы с постоянным и равным двум числом степеней свободы, каждый шарнир которых движется с одной степенью свободы?

## МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ЛИНЕЙНЫМИ УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

**Д.Н. Левитский, А.С. Кузнечиков, О.А. Новиков**

*РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва*

levitskiy.d@gubkin.ru

В работе показано составление матриц жесткости систем твердых тел с линейными упругими связями при исследовании динамической точности механизмов и их отличие от матриц жесткости, используемых при статических расчетах.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ УПРУГИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР ПО УПРУГОМУ ПУТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»

**Г.В. Михеев[1],Д.Ю. Погорелов[2], С.Б. Томашевский[2], А.Н. Родиков[1]**

[1]*ООО «Вычислительная механика», Брянск*

[2]*Брянский государственный технический университет, Брянск*

mikheev@universalmechanism.com

Предлагаются два подхода к моделированию динамики железнодорожных колесных пар с учетом упругости, в рамках которых рассматриваются конечноэлементные модели с вращающейся и невращающейся сеткой. Уравнения движения колесных пар выводятся с применением присоединенной системы координат и результатов модального анализа. Кинематика профиля колеса рассчитывается с учетом упругих перемещений узлов. Оба подхода реализованы в программном комплексе «Универсальный механизм». Колесные пары взаимодействуют с упругим путем. Рельсы могут моделироваться балочными либо объемными конечными элементами. Приводятся первые результаты моделирования, подтверждающие корректность предложенных методов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00815.

## ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ТЕРМОУПРУГОСТЬ НЕРАЗРЕЗНЫХ ГИБКИХ ПЛАСТИН С НАЧАЛЬНЫМ ПРОГИБОМ

**М.О. Моисеенко [1], О.Н. Попов [1]**

[1]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

mmo77@mail.ru

Рассматривается влияние граничных условий и начального прогиба (НП) на напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкой неразрезной гибкой пластины $a \times b \times h = 50 \times 100 \times 0{,}7$ см гибкостью $a/h = 50/0{,}7 = 71{,}4$, из материала − ВТ6, находящейся под воздействием неравномерного температурного поля. Граничные условия: а) шарнирно неподвижное опирание; б) шарнирно неподвижное закрепление, а по поперечным кромкам жесткое защемление. При расчете учитывается зависимость механических свойств материала от величины температуры. НДС в пластине характеризуется интенсивностью напряжений и прогибом. Согласно результатам расчета сделаны выводы: а) при малой толщине пластины большое влияние оказывают мембранные составляющих напряжений; б) при расчетах пластин с гибкостью больше 70 следует совместно учитывать НП, геометрическую нелинейность, неоднородность физических свойств, связанную с температурным воздействием; в) при линейном расчете полученные величины характеризующие НДС имеют погрешность; в) может изменяться знак напряжения в отдельных волокнах. г) качественно общие физические характеристики с изменением граничных условий близки; д) с ростом НП интенсивность напряжений и дополнительный прогиб уменьшаются.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА ПМКП-110

**А.А. Ольшевский[1], А.А. Ольшевский[2], С.В. Иншакова[1]**

[1]*Брянский государственный технический университет, Брянск*

[2]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

aaolshevsky@mail.ru

Разработана динамическая модель поглощающего аппарата фрикционного типа, в которой рассмотрены все элементы его конструкции. В модели учтено влияние упругой деформации корпуса на положение клиновой системы аппарата под нагрузкой. Приведены примеры моделирования соударения вагонов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»

**Д.Ю.Погорелов[1], Г.В. Михеев[2], А.Н. Родиков[2]**

[1]*Брянский государственный технический университет,Брянск*

[2]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

pogorelov@umlab.ru

Рассмотрены методы компьютерного моделирования динамики монорельсовых экипажей колесного типа и с магнитной левитацией с использованием подходов динамики систем тел. Экипажи моделируются пространственной системой абсолютно твердых и деформируемых тел, связанных шарнирами и силовыми элементамиразличных типов. Путевая структура является либо недеформируемой, либо представляется системой упругих тел – балок Тимошенко или моделей, созданных с использованием метода конечных элементов. Модели экипажей позволяют рассчитывать динамические процессы, и, в частности, исследовать устойчивость систем управления подвесок с магнитной левитацией.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00815.

## УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ УПРУГОГО ТЕЛА В АБСОЛЮТНЫХ УЗЛОВЫХ КООРДИНАТАХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ШИНЫ

**Д.Ю.Погорелов[1], А.Н. Родиков[2]**

[1]*Брянский государственный технический университет,Брянск*

[2]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

pogorelov@umlab.ru

Выведены уравнения движения упругого тела, в которых в качестве координат используются переменные, определяющие положение в абсолютном пространстве узловых систем координат. Предлагается использовать данную модель для формирования уравнений движения автомобильных шин. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-320004р_а.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

**А.Н. Родиков[1], Д.Ю. Погорелов[2]**

[1]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

[2]*Брянский государственный технический университет, Брянск*

rodikov@umlab.ru

Рассмотрена компьютерная модель железнодорожной контактной сети для моделирования ее динамики. Модель контактной сети состоит из двух проводов (несущий трос и контактный провод), моделируемых геометрически нелинейными предварительно напряженными балками. Несущий трос и контактный провод соединены в заданных точках силовыми элементами, моделирующими струны. В свою очередь несущий трос и контактный провод подвешены в заданных точках на упругих связях. Принимаются во внимание следующие факторы: зигзаг и провес контактного провода, натяжение и масса несущего троса и контактного провода, демпфирование в несущем тросе и контактном проводе, жесткость струн, масса зажимов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00815.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПРОФИЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОРОДОЖНЫХ КОЛЕС

**А.Н. Родиков[1], Д.Ю. Погорелов[2]**

[1]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

[2]*Брянский государственный технический университет, Брянск*

rodikov@umlab.ru

Рассмотрены методы компьютерного моделированияизнашивания профилей ж.-д. колес. Рельсовые экипажи моделируются пространственной системой абсолютно твердых и деформируемых тел, связанных шарнирами и силовыми элементамиразличных типов. Для определения сил в контакте колесо-рельс используется модель В. Кика и И. Пиотровского и алгоритм FASTSIMДж. Калкера. Расчет потерь материала осуществляется по моделям, основанных на теории, предложенной Арчардом. Согласно этой теории, потери материала прямо пропорциональны работе сил трения в контакте. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00815.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ДЕТАЛЕЙ

**С.Б. Томашевский, Г.В. Михеев**

*Брянский государственный технический университет, Брянск*

tomashevskiy@umlab.ru

Рассмотрены подходы к моделированию динамики механических систем, включающие упругие тела.Обсуждаются вопросы создания упругих частей механических систем в программе расчета динамики без использования сторонних конечно-элементных пакетов. Применяемые подходы иллюстрируются примерами моделирования железнодорожных экипажей.Созданные методы и алгоритмы реализованы в программном комплексе «Универсальный механизм» (www.universalmechanism.com) и доступны широкому кругу пользователей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 17-01-00815.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**С.Б. Томашевский, Г.В. Михеев**

*Брянский государственный технический университет, Брянск*

tomashevskiy@umlab.ru

Работа направлена на разработку уточненной модели шины, которая позволит моделировать динамику движения колесных машин по грунту с просадкой. Предлагаемая модель шины имеет большое число степеней свободы (до нескольких тысяч), поэтому программная реализация математической модели выполняется в форме, допускающей распараллеливание расчетов. Также в рамках проекта разрабатывается методика идентификации параметров динамической модели шины. Созданные методы и алгоритмы реализованы в программном комплексе «Универсальный механизм» и доступны широкому кругу пользователей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 18-41-320004 р_а.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ ПО СОБСТВЕННЫМ ЧАСТОТАМ КОЛЕБАНИЙ

**И.М. Утяшев**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

utyashevim@mail.ru

Рассматривается задача определения переменной площади сечения цилиндрического стержня по собственным частотам продольных колебаний. Концы стержня закреплены жестко. Предполагается, что площадь сечения меняется вдоль оси и описывается степенной функцией, причем площадь сечения в точке отсчета считается известной. Решение задачи основано на представлении фундаментальной системы решений в виде степенного ряда. Подстановкой собственных чисел в характеристическое уравнение получим систему линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Показано, что для определения n неизвестных коэффициентов степенной функции требуется n собственных значений. Постановка задачи и анализ результатов выполнены в рамках государственного задания на 2019-2022 годы (№ 0246-2019-0088). Численно-аналитическое решение выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 18-01-00150-А, 17-41-020230-р_а, 17-41-020400-р_а).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ РАСКРЫТИЯ РЕФЛЕКТОРА КАК СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**Ф.Р. Файзуллин**

*ООО «Автомеханика», Москва*

jake-take@yandex.ru

Рассматривается класс трансформируемых структурных ферменных конструкций на основе тетраэдрических ячеек. Конструкции используются в качестве развёртываемых крупногабаритных космических рефлекторов. Ранее для этого класса в программном комплексе EULERбыла разработана модель динамики раскрытия, представляющая конструкцию как систему твердых тел, учитывающая при этом деформации элементов и зазоры в шарнирах. Для проверки модели проведено раскрытие рефлектора на наземном стенде с высокоскоростной съемкой в двух проекциях. Благодаря учёту конструкции испытательного стенда модель этого рефлектора показывает динамику раскрытия с качественными особенностями, присущими реальной конструкции.

## К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМЫ ТВЁРДЫХ ТЕЛ ПРИКРЕПЛЕННЫХ К БАЛКЕ ТИМОШЕНКО

**А.В. Харахинов**

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ*

comma967gmail.com

Для одного класса механических систем, состоящей из системы взаимосвязанных твердых тел, упруго прикрепленной к балке Тимошенко, предлагается обобщенная математическая модель, описываемая гибридной системой дифференциальных уравнений. Получено условие существования обобщенного решения гибридной системы дифференциальных уравнений. Сравнительный анализ численных расчетов предложеннымметодом с расчетами проведенными другими способами, известными из литературы, показывает достоверность предлагаемого подхода.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И НАПРЯЖЕНО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В НАТУРНЫХ ОБРАЗЦАХ АВИАКОНСТРУКЦИЙ

**Ньян Мин Хтет, И.В. Волков**

*Московский физико-технический институт (государственный университет)*

Volkoviv39@mail.ru

Представлена новая методика исследования НДС и концентрации напряжений при испытаниях натурных авиаконструкций. Получены новые результаты исследования НДС в зоне концентрации у отверстий.

## О ПОСТУПАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ СИСТЕМЫ «ВЯЗКОУПРУГАЯ ПЛАНЕТА-СПУТНИК» В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ СИЛ ВЗАИМНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ

**А.В. Шатина, А.В. Старостина**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

shatina_av@mail.ru

Исследуется поступательно-вращательноедвижение системы «планета-спутник» в гравитационном поле сил взаимного притяжения. Планета моделируется телом, состоящим из твердого ядра и жестко прикрепленной к нему вязкоупругой оболочки, а спутник – материальной точкой. С помощью асимптотического метода разделения движений в канонических переменных Андуайе-Делоне получена система обыкновенных дифференциальных уравнений движения 12-ого порядка. Она описывает взаимное изменение вращательного движения планеты и орбитального движения спутника под воздействием возмущений, вызванных упругостью и диссипацией.

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ В ИМПУЛЬСАХ ПУАССОНА

**В.А. Шимановский, В.Н. Иванов**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

vlshim@psu.ru

В работе представлена новая матричная форма уравнений движения механических систем, состоящих из абсолютно твердых тел и имеющих структуру дерева, выписанная относительно обобщенных координат, квазискоростей и обобщенных импульсов Пуассона. Предложен алгоритм разрешения полученных уравнений относительно производных независимых координат, основанный на разложении Холецкого. Получены рекуррентные формулы, позволяющие алгоритмизировать все этапы формирования математической модели. Показано, что вычислительная трудоемкость решения уравнений динамики с использованием данного алгоритма линейно зависит от числа тел в механической системе, что говорит об его эффективности.

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ «АНТИГРАВИТАЦИИ» У ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ

**В.Н. Оникийчук, И.В. Оникийчук**

*Москва*

Valery_1953@inbox.ru;ionikv@inbox.ru

Установлен динамический эффект выталкивания из гравитационного поля свободных твердых вращающихся тел. Эффект достигается при наличии некоторой критической скорости вращения относительно собственного центра масс. При превышении критической скорости вращающееся тело выталкивается из гравитационного поля и удаляется от центра притяжения. Так, например, для тонкого кольца, расположенного в плоскости местного горизонта, минимальной критической скоростью вращения относительно центра масс, является первая космическая скорость, т.е. примерно 7,9 км/с (в поле тяготения Земли).

Указанный эффект существует всегда у вращающихся тел и способен объяснить ряд астрономических эффектов. Эффект «антигравитации» у вращающихся тел может стать новым физическим принципом движения для нового типа летательных аппаратов, способных перемещаться в космическом пространстве без реактивных двигателей. Названный эффект разрушает принцип равенства инертной и гравитационной массы, поскольку за счет скорости вращения тела относительно собственного центра масс гравитационную массу тела теоретически можно сделать не только «нулевой», но и «отрицательной».

## Подсекция I-5. МЕХАНИКА МАШИН И РОБОТОВ

### О ХЛОПКОУБОРОЧНОМ АППАРАТЕ С СИММЕТРИЧНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ШПИНДЕЛЬНЫХ БАРАБАНОВ.

**А.Абдукаримов, Г.А.Бахадиров,Ш.Р. Хуррамов, С.М. Мадаминов, Х.Н. Рахмонов**

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз., Ташкент*

aabdusalam54@gmail.com

На основании обзора и анализа конструкции существующих хлопкоуборочных аппаратов и НИР в этой области показаны недостатки существующих хлопкоуборочных аппаратов, которые приводят к снижению надежности и производительности хлопкоуборочной машины. Описывается устройство и принцип работы нового хлопкоуборочного аппарата с симметричным перемещением шпиндельных барабанов. Показаны преимущества вновь разработанного хлопкоуборочного аппарата перед существующими аналогами.

Работа выполнена при поддержке гранта ФА-А тех-2018-253.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ДЕТАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ МЕКАНУМ-КОЛЁС И КОНТАКТНЫХ СИЛ

**Б.И. Адамов[1], А.И. Кобрин [2], Г.Р. Сайпулаев [3]**

[1, 2, 3]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

adamoff.b@yandex.ru

Рассматривается динамика мобильной всенаправленной платформы, оснащённой двумя парами меканум-колёс. Построены уравнения кинематики и динамики системы с учётом реальной геометрии роликов колёс и ограниченности контактных сил. Проведён сравнительный анализ динамических моделей системы. В «классической» неголономной модели колесо моделируется диском, проскальзывающим в направлении, ортогональном оси ролика; в уточнённой неголономной модели полностью учтена реальная конструкция колёс, а уравнения связей получены осреднением условий непроскальзывания роликов. Рассмотрены модели системы, в которых учитывается и реальная конструкция колёс, и проскальзывание с различными моделями контактных сил.

### АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ УПРУГОСТИ

**А.В. Антонов[1], В.А. Глазунов[1]**

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

ant.ant.rk@gmail.com

Рассмотрен пространственный механизм параллельной структуры с шестью степенями свободы и двигателями, расположенными на основании вне рабочей зоны. Подробно описаны структура данного механизма и его принцип работы. Получена модель анализа динамики выходного звена механизма с учетом сил упругости, возникающих в его звеньях и действующих на данное звено, составлены уравнения движения. Приведен пример анализа движения согласно полученным уравнениям. Разработан макет рассматриваемого механизма и его система управления. Проведены эксперименты, подтвердившие правильность теоретических расчетов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-04273, офи-м.

### ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ЦИКЛОВЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ НА ПОДВОДНЫХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

**В.В. Арыканцев[1], В.В. Чернышев[2]**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

arvstu@mail.ru

Опыт испытаний шагающих машин с цикловыми движителями показывает, что они превосходят традиционные машины по проходимости, отличаясь при этом простотой и надежностью. Однако, высокие энергозатраты на преодоление инерционных сил ограничивают скорость их передвижения. Работа посвящена исследованию динамической модели шагающей машины указанного типа при движении по водонасыщенным и подводным грунтам. Модель позволяет оценить затраты мощности на передвижение по таким грунтам. Результаты работы могут быть востребованы при разработке роботов, предназначенных для подводно-технических работ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-01180 и стипендии президента РФ СП-5102.2018.1.

### ОСОБЕННОСТИ ВИНТОВОГО ВАЛА С ПОСТОЯННЫМ И ПЕРЕМЕННЫМ ШАГОМ ВИНТА

**Г.А. Бахадиров**

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, Ташкент*

instmech@rambler.ru

В известных винтовых валах с увеличением шага винта увеличивается и угол подъёма винтовой линии. Поставлена и решена задача обеспечивающая увеличение шага винта с постоянным углом подъема. Результаты исследования позволили разработать справочный вал с винтовыми расправляющими элементами, установленными с увеличивающимся шагом от середины вала к его краям, при этом винтовые расправляющие элементы винтового вала имеют постоянный угол подъёма. Работа выполнена при поддержке гранта Узб. ФА-Атех-2018-254.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОГРУЗКИ И РАЗГРУЗКИ АВТОМОБИЛЯ-САМОСВАЛА

**Ю.Н. Барышников[1]**

[1]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

mhts@list.ru

Представлены результаты математического моделирования процесса погрузки и разгрузки автомобиля-самосвала Рассмотрены случаи погрузки и разгрузки груза как монолитной глыбы. При погрузке полагалось, что удар падающего груза абсолютно неупругий. Исследована динамика движения автомобиля после удара. При разгрузке груза модель автомобиля построена на основе уравнений Лагранжа. Исследовано силовое взаимодействие платформы и рамы, а также устойчивость автомобиля при разгрузке. В результате эксперимента вычислен предельно допустимый угол наклона площадки разгрузки, исключающий опрокидывание автосамосвала. Результаты могут быть использованы при проектировании автомобилей-самосвалов.

## ДИНАМИКА(КИНЕМАТИКА) ЗВЕНА МАНИПУЛЯТОРА С УПРАВЛЯЕМЫМ ИЗГИБОМ

**Д.Р. Богданов[1], О.В. Даринцев[1,2]**

[1]*Институт механики им Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

dr_bog@mail.ru

В статье рассматривается новый класс манипуляторов– с управляемым изгибом, положение рабочей точки которых в пространстве определяется формой образующих их звеньев. Разнообразие конструкций подобных манипуляторов обусловлено специфичными механизмами изменения формы звеньев, что приводит к необходимости разработки адекватных кинематических и динамических моделей. Приведены результаты кинематического и динамического анализа манипулятора, состоящего из звеньев, построенных на базе твердотельных элементов со сферической поверхностью и приводимых в движение с помощью гибких тросов.

Работа выполнена в рамках госзадания №0246-2018-007 и при поддержке Программы Президиума РАН № I.29П.

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЛОКОМОЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДВУХ ТЕЛ НА ПЛОСКОСТИ С СУХИМ ТРЕНИЕМ

**Н.Н. Болотник[1], Т.Ю.Фигурина[1]**

[1]Институт проблем механики РАН, Москва

bolotnik@ipmnet.ru

Решена задача о наибыстрейшем перемещении системы двух взаимодействующих тел на заданное расстояние вдоль прямой на плоскости с сухим кулоновым трением. Предполагается, что в начале и конце движения оба тела покоятся и их взаимное расположение одинаково. Ограничений на силу взаимодействия, являющейся управляющей переменной, не накладывается. Также решена задача о безреверсном наибыстрейшем перемещении при условии, что ни одно из тел не движется в направлении, противоположном смещению системы за все время движения.

Работа выполнена в соответствии с темой госзадания АААА-А17-117021310387-0 при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-01-00652).

## МОДЕЛЬ ЛЫЖНИКА-СНОУБОРДИСТА В ВИДЕ НЕВЕСОМОГО СТЕРЖНЯ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ МАССАМИ НА АБСОЛЮТНО ТВЕРДОЙ ИНЕРЦИОННОЙ ЛЫЖЕ

**А.В. Борисов[1]**

[1]*Филиал ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск*

BorisowAndrej@yandex.ru

Так как тело человека гибко, для моделирования одним звеном лыжника-сноубордиста, предложена модель в виде звена переменной длины. Модель состоит из невесомого стержня переменной длины с произвольным количеством сосредоточенных, жестко закрепленных на стержне точечных масс. Лыжник-сноубордист, представляется системой двух подвижных, соединенных шарнирно-звеньев. Одно, абсолютно твердое тело моделирует лыжу, движущуюся по снегу с наложенной в зоне контакта неголономной связью. Второе звено переменной длины, шарнирно закрепленное на лыже, моделирует человека.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00261 А.

## ОДНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО МЕХАНИЗМА В ВИДЕ РОБОТА-ГУСЕНИЦЫ, ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИНЫ ТЕЛА И СИЛ ТРЕНИЯ ВДОЛЬ ПРЯМОЙ

**А.В. Борисов [1], Г.М. Розенблат[2]**

[1]*Филиал ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск*

[2]*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

BorisowAndrej@yandex.ru, gr51@mail.ru

В статье предложен новый способ перемещения плоских механизмов с помощью сжатия-растяжения корпуса. Рассматривается простейшая одномерная модель движения вдоль оси. Составляются дифференциальные уравнения ее движения, и проводится ана-

литическое исследование. В природе подобную модель передвижения, основанную на изменении длины тела, имеют гусеницы и черви. Практическое применение такие механизмы могут найти при перемещении в узких трубах, сосудах и т.п.
Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310382-5).

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА ПО ДВУМ ЗАДАННЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ

**Е. С. Гебель[1], А. А. Джомартов [2]**
[1]*Омский государственный технический университет, Омск*
[2]*Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Алматы*
Gebel_es@mail.ru

В работе предложен численно-аналитический метод кинематического синтеза плоских шарнирных четырехзвенных механизмов.На основе известных подходов кинематики, геометрии и функционального анализа разработан метод, который позволяет сократить объем априорной информации необходимой для решения задачи геометрического синтеза. Полученные аналитические зависимости первого порядка исключают одновременное наличие нескольких возможных решений. Метод позволяет на стадии проектирования оценить особые положения звеньев и выполнить численную проверку результатов синтеза, а также гарантировать требуемую точность решения.

## ПЕРЕНОС ХРУПКОГО ЦИЛИНДРА ТРЁХПАЛЬЦЕВЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

**Ю.Ф. Голубев[1,2], Е.В. Мелкумова[2]**
[1]*Институт прикладной математики имени М.В.Келдыша РАН, Москва*
[2]*Московский государственный университетимени М.В.Ломоносова, Москва*
elena_v_m@mail.ru

Исследуется задача об удержании хрупкого прямого кругового шероховатого цилиндра пальцами рук робота манипулятора.Каждый из пальцев имеет одну точку в контакте с цилиндром. Численно и аналитически получены возможные области расположения точек контакта на цилиндре, для которых существует решение задачи кинетостатики при переносе цилиндра двумя и тремя пальцами. Эта задача имеет аналогии задачам о равновесии многоногого шагающего робота на поверхности объекта цилиндрической формы или робота опирающегося на произвольную поверхность, точки подвеса ног которого на корпусе расположены на поверхности цилиндра. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).

## УМНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В БИОМЕДИЦИНСКОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

**А.Е. Городецкий[1], И.Л. Тарасова[1,2], В.Г. Курбанов[1,3]**
[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,Санкт-Петербург*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,Санкт-Петербург*
g27764@yandex.ru

Целью публикации является описание подхода к решению проблемы создания искусственных органов, заменяющих свои природные прототипы, базирующегося на использовании различных архитектурных соединений стандартных модулей SEMS. Результаты: Рассматриваются типы архитектур умных электромеханических систем. Показывается, что разнообразные объединения (последовательные, параллельные, древовидные и др.) структур SEMS позволяют легко конструировать разнообразные интеллектуальные биомедицинские робототехнические устройства. Практическое значение: Использование различных типов архитектур SEMS в биомедицинской робототехнике обеспечивает их дополненной возможностью тонкой донастройки пользователем, когда человек сам может настроить требуемые параметры и их реакцию на те, либо иные среды и объекты, что значительно повышает качество медицинской техники. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-04424, 18-01-00076, 19-08-00079

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОБОТОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ БАССЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ НА АЭС

**В.Г. Градецкий[1], М.М. Князьков [1], Е.А. Семенов[1], А.Н. Суханов[1]**
[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), 119526, Россия, Москва, Проспект Вернадского 101-1*
Ipm_labrobotics@mail.ru

В статье рассматривается возможность использования робота вертикального перемещения как составной частиробототехнического комплекса для ремонта облицовки бассейна АЭС. Робот может быть использован для технической диагностики и ремонта вертикальных и горизонтальных стенок бассейнов выдержки, как в воздушной, так и в водной среде. Актуальной задачей для таких комплексов является надежное закрепление робота на вертикальной поверхности в водной среде в условиях повышенной радиации. Рассматриваются динамические процессы, возникающие в процессе закрепления робота на поверхности с помощью устройства сцепления с поверхностью. Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310384-9).

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ.

**В.Г. Градецкий [1], И.Л. Ермолов[1], М.М. Князьков [1], Б.С. Лапин[2], С.А. Собольников[2], Е.А. Семенов[1], А.Н. Суханов[1]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва*

[2] *МГТУ "СТАНКИН", Москва*

Ipm_labrobotics@mail.ru

В статье рассматриваются результаты моделированияуправления группой роботов в различных условиях среды, в которых были получены многопараметрические функциональные зависимости скорости вращения колеса отдельного мобильного робота от нагрузки, типа поверхности, сопротивления среды и наличия проскальзывания. Для подтверждения результатов компьютерного моделирования была проведена серия натурных экспериментов, по результатам которых были выявлены особенности взаимодействия колёс мобильного робота с поверхностью перемещения при выполнении групповой транспортной задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-29-04199 офи_м.

## О ПЕРСПЕКТИВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РАБОТЕ СИСТЕМЫ ТОПЛИВНОЙ АВТОМАТИКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Е.В. Денисова**

*Институт механики им.Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

denisova@anrb.ru

В докладе раскрываются причины появления аварийных ситуаций, которые могут возникнуть по вине топливной автоматики. Приводится обоснование необходимости применения в топливных системах новых материалов, обладающих повышенной механической прочностью. Исследуются свойства предлагаемых материалов. Описаны новые конструкции элементов топливной автоматики, обоснованы перспективы их применения. Работа выполнена в рамках госзадания № 0246-2019-0089.

## МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ КРИВОШИПНОГО ПРЕССА НА БАЗЕ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА 4-ГО КЛАССА

**А.А. Джомартов[1], А.К. Тулешов[2] , М. Ж. Куатова[1]**

[1]*Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан*

legsert@mail.ru

Рассмотрено моделирование динамики кривошипного пресса с главным рабочим механизмом (ГРМ) на базе плоского рычажного механизма 4-го класса с использованием программного комплекса SimulationX. SimulationX - это междисциплинарный программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем. Построенная динамическая модель кривошипного пресса на программном комплексе SimulationX позволяют моделировать динамику кривошипного пресса с учетом взаимодействия со всеми его узлами с учетом зазоров в соединениях и узлах, силы сопротивления и характеристики электродвигателя. Установлено, что динамические нагрузки в узлах кривошипного пресса резко возрастают в момент включения муфты и срабатывания тормоза. Работа выполнена по проекту № AP05134959 по бюджетной программе 217 «Развитие науки» подпрограмме 102 «Грантовое финансирование научных исследований».

## СИНТЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**А.Ю. Дракунов, Ю.М. Дракунов**

*Институт механики и машиноведения РК, Алматы*

drakunov50@mail.ru

В работе рассмотрен общий метод синтеза простых пространственных рычажных механизмов. Предложен точный интерполяционный синтез по полному числу параметров и приближенный квадратичный метод для множества заданных положений механизма. Задача решается с помощью векторного и матричного исчисления. Рассмотрено решение конкретных прикладных задач. Весь процесс синтеза автоматизирован с помощью СКА Maple. Работа выполнена при поддержке гранта РК № AP05134959.

## РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТРИПОДА

**В.В. Жога[1], И.А. Несмиянов [2], Н.С. Воробьева [2], В.В. Дяшкин-Титов [2], А.В. Дяшкин [2], А.Г. Иванов [2], М.Е. Николаев [2], Я.В. Калинин[1]**

[1]*Волгоградский государственныйтехнический университет, Волгоград,*

*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис, Иннополис;*

[2]*Волгоградкий государственный аграрный университет, Волгоград*

viczhoga@gmail.com

Рассматриваются особенности конструкций манипуляторов параллельно-последовательной структуры, приводятся области их применения. Описываются кинематические и динамические методы синтеза управляющих сигналов исполнительных приводов. Кинематические методы синтеза основаны на аппроксимации задающих воздействий сплайнами четвертого порядка на первом и

последнем участках траектории и квадратичной аппроксимацией на промежуточных участках траектории. Динамические методы синтеза построены на использовании нелинейных уравнений динамики манипулятора, обеспечивающих позиционирование объекта манипулирования в трехмерном пространстве. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-342002.

## НОВЫЕ РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПРЯМОЛИНЕЙНО-НАПРАВЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЛЯ ПРИВОДА НОГИ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

**С.М. Ибраев, Г.А. Айдашева [1], Н.К. Джамалов, А.С. Ибраев, Г.М. Мухамбеткалиева[2]**

[1]*Институт механики и машиноведения имени академика У.А.Джолдасбекова КН МОН Республики Казахстан, Алматы, Казахстан*

[2]*Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

askarovna_gulnur@mail.ru

В работе предлагаются альтернативные кинематические схемы опорно-двигательного механизма шагающей машины на основе плоского рычажного механизма, чертящая точка которого (центр стопы) генерирует семейство горизонтальных прямых линий. Адаптация ноги к неровностям опорной поверхности и изменение высоты шасси осуществляется путём регулирования длины подвижного звена. Синтез основан на решении аппроксимационной задачи квадратического приближения. Предложены две кинематические схемы опорно-двигательного механизма, соответствующие двум локальным минимумам задачи.

## О МЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВИЖИТЕЛЕЙ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Я.В. Калинин[1,2]**

[1]*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

[2]*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Иннополис*

jkv83@mail.ru

Описываются и анализируются механические эффекты, возникающие при взаимодействии шагающего движителя с опорной поверхностью, которые обусловливаются спецификой шагающего способа перемещения. Строятся способы целенаправленного управления такими эффектами за счёт рационального учёта физико-механических свойств среды и управления свойствами опор шагающих движителей и управления перемещением движителей. Строятся законы управления движителями и их свойствами, обеспечивающие достижение оптимума для заданных показателей качества движения: минимума тепловых потерь в приводных двигателях и т.д. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10069.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЗМА

**В.В. Карташев, А.А. Кириленко**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

kart@list.ru

Программное моделирование динамики движения машин и роботов является распространенным методом исследования их работы в различных условиях применения. В докладе описывается метод имитационного моделирования, который основан на представлении узлов механизмав виде геометрических тел. Для определения динамики движения системы тел используется принцип виртуальных перемещений Даламбера-Лагранжа. Приводятся результаты моделирования динамики движения манипуляционного робота и адаптивного сборочного устройства. Они показывают, что для механизмов, включающих несколько кинематических пар, все необходимые вычисления могут быть выполнены на персональном компьютере в масштабе реального времени.

## ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЛОКОМОЦИЕЙ ДВУНОГИХ РОБОТОВ

**В.И. Конченков,А.С. Горобцов, П.С. Тарасов, А.В. Скориков, А.Е. Марков**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

vm@vstu.ru

Рассматривается задача устойчивости управляемого движения двуногих шагающих роботов. Представлен метод решения уравнений обратной задачи с учетом неголономных связей, которые определяют условия устойчивости робота. Рассмотрена реализация метода на основе методов динамики систем связанных тел. Представлены результаты устойчивого управления локомоцией антропоморфного робота AR-600E на примере различных типов походки.

## ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БТС ДЛЯ ОБХОДА ГРУППЫ СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ПЛОСКОМ ОСНОВАНИИ

**А.В. Леонард**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

Alex-Leonard@yandex.ru

В работе представлен анализ существующих методов и алгоритмов планирования движения для роботизируемых аппаратов: определяются их недостатки. Для устранения недостатков предлагается подход по планированию движения беспилотным транспортным средством на основе вариационного исчисления. Формализуются законы движения робота в дифференциальном виде по обходу группы статичных препятствий. Робот моделируется материальной точкой на плоскости, препятствия – окружностями произвольного радиуса и расположения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-60086 мол_а_дк.

## АНАЛИЗ ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НЕПОЛНОПРИВОДНОГО ТРОСОВОГО РО БОТА И МЕТОДЫ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

**А.В.Малолетов[1,2], М.Ю. Фадеев[1], А.С. Климчик[1]**

[1]*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис,Иннополис*

[2]*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

a.maloletov@innopolis.ru

В исследовании разработана математическая модель прямой и обратной кинематики неполноприводного тросового робота, учитывающая особенности конструкции механизмов лебёдок и статическое провисание тросов. Проведён теоретический и экспериментальный анализ ошибок позиционирования мобильной платформы, зависящих от погрешности определения параметров робота, ошибок калибровки нулевого положения и погрешностей при учёте провисания тросов под действием силы тяжести. Разработанные методы управления тросами и компенсации ошибок были использованы в системе управления прототипом тросового робота.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-01234.

## К ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА НА СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

**А.С. Мещанов, Р.Т. Сиразетдинов, Э.А. Туктаров**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ, Казань*

mas41@list.ru

Получен метод стабилизации оси оптического прибора по углам тангажа и рыскания на скользящих режимах в условиях нелинейности, не стационарности, перекрестных связей и не инвариантности к неопределенностям. Качество переходных процессов формируется вращениями и смещениями двух плоскостей скольжения относительно начала координат. Точность достигается настройкой параметров управления и уменьшением неопределенности с повышением точности ее идентификации и компенсации.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-48-160042.

## СПЕЦИФИЧНОСТЬ МЕХАНИКИ УМЕНЬШЕННОГО ВАРИАНТА КАПИЛЛЯРНОГО МИКРОЗАХВАТА

**А.Б. Мигранов[1], О.В. Даринцев[1, 2], Д.Р. Богданов [1]**

[1]*Институт механики им. Р.Р.Мавлютова, УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

abm.imech.anrb@mail.ru

В статье описаны конструкция и принцип работы ультразвукового капиллярного микрозахвата, реализующего удержание микрообъектов за счет капиллярных сил, а выпускание – за счет применения ультразвукового генератора. Предлагаемые новые конструкция и принцип работы капиллярного микрозахвата являются дальнейшимразвитиемразработанного ранеепрототипа, имевшего значительно большие габариты и использовавшегося в качестве лабораторного стенда.Рассмотрена упрощенная математическая модель сил поверхностного натяжения и произведен предварительный расчет величины максимального веса удерживаемого микрообъекта.

Работа выполнена в рамках госзадания № 0246-2018-007.

## СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАНКОМ-РОБОТОМ

**Р.А. Мунасыпов, Р.Г. Кудояров, О.К Акмаев., С.И. Фецак, Б.А. Еникеев**

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

rust40@mail.ru

Приведены результаты работы, выполняемой в соответствии с Госзаданием Министерства науки и высшего образования РФ (тема №9.11513.2018/11.12) по разработки адаптивного управления обработкой сложнопрофильных деталей перспективных ГТД с использованием опытного образца станка-робота.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАНОСА КОЛЕСНОГО АППАРАТА НА ВИРАЖЕ

**А.П. Новодерова**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

an.novoderova@yandex.ru

Рассмотрена начальная стадия заноса двухосного четырехколесного аппарата на вираже, возникающем при блокировке или пробуксовке колес одной из его осей, когда колеса другой оси сохраняют сцепление с опорной плоскостью или скользят по ней. Проводится анализ, когда следование принятой в теории вождения автомобиля рекомендации "поворачивать руль (передние колеса) в сторону заноса задней оси" позволяет уменьшить угловую скорость аппарата скорее, чем при неповернутых или повернутых в другую сторону передних колесах. Показано, что при заносе обеих осей в рамках модели сухого трения В.Ф. Журавлева развитие заноса аппарата происходит менее интенсивно, чем для модели кулонова трения.

## ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО ВАРИАТОРА С ДВУМЯ СФЕРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗУЮЩИМИ МЕХАНИЗМАМИ

**И.В. Нотов**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

*ivan_notov@mail.ru*

На сегодняшний день существует два типа вариаторов, это фрикционные и импульсные, работа последних основана на преобразовании колебаний в необходимое движение ведомого звена. В работе, представлена конструктивная схема импульсного вариатора с двумя сферическими преобразующими механизмами, который имеет возможность синхронизировать скорости ведомых валов. Для разработанного импульсного вариатора проведен, на основе экспериментальных данных, анализ неравномерности вращения выходных звеньев и приведена оценка плавности работы ведомых валов механизма в зависимости от настройки положения колеблющихся звеньев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00170.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ДВУХКОЛЕСНОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

**А.М. Нунупаров[1,2], В.Г. Чащухин[1]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[2]*Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва*

ketlk@mail.ru

Исследуется равновесие двухколесного робота на наклонной поверхности. Прижатие робота к поверхности осуществляется аэродинамическим способом. Предложен способ уменьшения энергопотребления робота при помощи регулирования силы прижатия на основе данных об ориентации робота в пространстве.

Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А17-117021310384-9 “Механика и управление движением роботов и робототехнических систем” при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00650 А и программы РАН "Актуальные проблемы робототехнических систем".

## МОДЕЛЬ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО АКТЮАТОРА

**А.М. Нунупаров[1,2]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[2]*Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва*

anunuparov@gmail.com

Исследуются механические характеристики теромеханического актюатора на основе экспериментальных данных. Актюатор моделируется в виде шарнирного многозвенника, один конец которого закреплен на горизонтальной направляющей, а на свободный конец действует сосредоточенная сила. В исследовании построена математическая модель термомеханического актюатора и идентифицированы параметры экспериментального образца.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310384-9) и частичной поддержке программы РАН Актуальные проблемы робототехнических систем.

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СТАИ РОБОТОВ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ

**И.А. Орлов[1], В.Д. Сенотов[2], А.П. Алисейчик[1], Д.А. Грибков[1], А.В. Подопросветов[1], Н.В. Петровская[2], В.Е. Павловский[1]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва*

[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

i.orlov@keldysh.ru, senotovel@gmail.com, aliseychik@keldysh.ru, legovas@gmail.com, llecxis@gmail.com, npetro@mail.ru, vlpavl@mail.ru

Статья посвящена разработке и анализу алгоритмов управления группами мобильных роботов. Разработана динамическая модель стаи роботов. Реализован алгоритм децентрализованного управления стаей роботов с дифференциальным приводом на основе правил К. Рейнольдса в задаче движения к цели. Введены метрики, оценивающие стайное движение группы роботов и эффективность его. Проведено моделирование движения при различных параметрах алгоритма и различных сценариях. Произведен анализ зависимостей метрик от параметров алгоритма.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04412 офи_м и программы Президиума РАН № 29.

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

**П.А. Побегайло**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

petrp214@yandex.ru

В настоящей работе кратко представлены основные результаты, полученные при комплексном исследованиикарьерных экскаваторов. Выбор в качестве объекта исследования карьерных экскаваторов мотивирован, в первую очередь, практической стороной дела - а именно, потребностью в реализации государственной программы по добыче угля.

Основными результатами работы являются: построение методологии проектирования рабочего оборудования мощных гидравлических экскаваторов; разработкаэлементов части потребных там физических моделей оценки динамики. Также рассмотрены некоторые задачи синтеза системы управления экскаватором.

Часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 17-08-00920.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАРИАНТОВ УПРАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗУЮЩИМ МЕХАНИЗМОМ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

**А.В. Попов**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

apopov34@rambler.ru

Представлен вариант компоновки и пространственная виртуальная модель сферического механизма с тремя степенями свободы. Составлена расчётная схема для определения передаточной функции такого механизма. Аналитически определена связь управляемых углов отклонения с параметрами преобразования движения. Рассчитаны основные режимы работы сферического механизма. На примере использования сферического механизма в вариаторе скорости предложены варианты управления передаточным отношением. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00170.

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОТЕРИ ТЯГИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ СТАРТЕ

**С.А. Решмин**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

reshmin@ipmnet.ru

Обнаружен эффект значительной и резкой потери максимально возможной средней силы тяги во время разгона транспортного средства при несимметричных или несинхронных колебаниях ведущих колес в вертикальной плоскости. Эффект проявляется на транспортных средствах с межколесным дифференциалом при интенсивном старте с проскальзыванием и может быть опасен при выезде на высокоскоростные автомагистрали и при пересечении нерегулируемых перекрестков. Указаны колебательные режимы, приводящие как к частичной, так и к почти полной потере средней силы тяги. Найден крутящий момент, подаваемый на колесную пару, обеспечивающий максимально быстрый разгон в колебательных режимах. Проанализирована кинематика процесса при движении с минимальными энергозатратами.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00307.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВИБРОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИМИСЯ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯМИ

**С.А. Румянцев[1], Е.Б. Азаров[1], А.М. Шихов[1]**

[1]*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

SRumyantsev@usurt.ru

В докладе приводятся результаты исследований динамики вибротранспортных машин с помощью математических моделей и в ходе экспериментов на лабораторном вибростенде. Наиболее интересные результаты получены для машин с тремя вибровозбудителями. В этом случае удается получить неоднородное поле вибрации вдоль рабочей поверхности машины, что дает возможность проектировать машины с весьма полезными эксплуатационными качествами. Для этого же типа машин экспериментально установлено явление «сохраненной самосинхронизации», позволяющее существенно экономить электроэнергию.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00605.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВАЛЬНО-ПЛАНЕТАРНОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ С ОДНОПАРНЫМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ

**К.Б. Саламандра[1]**

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

ksalamandra@yandex.ru

Особенностью многопоточных вально-планетарных коробок передач является одновременное выключение и включение двух или трех пар управляемых элементов при переключениях между некоторыми соседними ступенями. Такие переключения приводят к увеличению времени включения ступени и, как следствие, снижению КПД, комфорта и управляемости транспортного средства. Описывается методика и приведен пример параметрического синтеза 9-ти ступенчатой трехпоточной вально-планетарной коробки передач с однопарными переключениями между соседними ступенями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10493).

## МЕХАНИЗМЫ ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

**К.М. Толстов, Е.В. Письменная**

*ООО ЭкзоАтлант, Москва*

tolstovkm@yandex.ru, epismen@yandex.ru

В докладе излагаются основные подходы к конструированию несущих систем и приводов экзоскелетов нижних конечностей, используемых как в промышленности, так и в медицинских целях. Описаны основные принципы проектирования кинематических схем и компоновок механизмов экзоскелетов нижних конечностей в зависимости от области применения и служебного назначения экзоскелетов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РОБОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**К.З. Хайрнасов**

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва*

kamilh@mail.ru

Рассматриваются разработанные методики и алгоритмы статического и динамического анализа конструкций робототехнических систем, на основе многостепенных динамических стендов полунатурного моделирования, предназначенных для имитации полетных характеристик авиационной аппаратуры. Приведены расчеты робототехнических систем из композитных материалов и магниевого сплава. Робототехнические системы аппроксимируются стержневыми, многослойными оболочечными и объемными конечными элементами. Разработанная методика и алгоритмы позволяют определить: частотные характеристики; напряженно-деформационное состояние робототехнических систем различных конструкций при статических и динамических нагрузках.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ШАГАЮЩЕГО СПОСОБА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ В ПОДВОДНЫХ УСЛОВИЯХ

**В.В. Чернышев[1], В.В. Арыканцев[2]**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

vad.chernyshev@mail.ru

Обсуждаются результаты исследования динамики управляемого движения шагающих машин и роботов передвигающихся по дну. Такие машины при проведении подводно-технических работ имеют ряд преимуществ по сравнению с колесными и гусеничными. Исследовалась динамика маршевых режимов движения, а также поворот и режим преодоления препятствий. Выявлены некоторые особенности шагающего способа передвижения, обусловленные подводными условиями. Анализ базируется на результатах моделирования динамики многоногих шагающих машин с движителями циклового типа, а также на результатах подводных испытаний шагающего робота МАК-1. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-41-340010, 19-08-01180.

## МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАЮЩЕГО РОБОТА С ПЕРЕМЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

**М.Ю. Шавин [1], Д.А. Притыкин [2]**

[1] *Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

[2] *Сколковский институт науки и технологий, Сколково*

shawinmihail@gmail.com

В работе рассматривается управляемая динамика летающего робота, представляющего собой составной беспилотный летательный аппарат мультироторного типа. Аппарат состоит из корпуса с выходящими из него четырьмя лучами, на концах которых закреплены двигатели с пропеллерами. Каждый из двигателей может поворачиваться вокруг луча, к которому он прикреплен, меняя направление создаваемой им тяги. Построена модель динамики аппарата и контур управления, позволяющий независимо управлять ориентацией и положением аппарата. Учтены ограничения на максимальные обороты двигателей и углы отклонения сервоприводов. Проведен сравнительный анализ алгоритмов оценки состояния. Предложены алгоритмы экстренного управления в случае одновременного отказа двух смежных двигателей. Работоспособность алгоритмов иллюстрируются численными экспериментами.
Работа выполнена при поддержке лаборатории перспективных систем управления МФТИ.

## ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИЗБЫТОЧНЫМ ЧИСЛОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**Н.Г. Шаронов**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

*Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Иннополис*

sharonov@vstu.ru

Рассматриваются особенности управления избыточным числом приводов мобильных роботов с движителями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью. Приводятся методы и результаты исследования режимов движения, оптимальных по заданному критерию и заданной функциональной зависимости между усилиями в приводах шагающих движителей.Представлены примеры решения как модельных задач, так и исследования особенностей управления многоприводными многоногими шагающим роботами с ортогонально-поворотным («Ортоног») и якорно-тросовым движителями.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10069.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СТЫКОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРИФЕРИЙНОГО МЕХАНИЗМА С НАКОПЛЕНИЕМ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СБЛИЖЕНИЯ

**А.В. Яскевич**

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Королев Московской обл.*

Andrey.Yaskevich@rsce.ru

Стыковка космических аппаратов является управляемым механическим процессом их сборки на орбите с использованием активного и пассивного стыковочных агрегатов. Стыковочный механизм активного агрегата обеспечивает условия для сцепки, поглощение энергии сближения, выравнивание, стягивание агрегатов и космических аппаратов для их окончательного жесткого соединения. В новом стыковочном механизме используется накопление кинетической энергии сближения вместо традиционного демпфирования. В докладе описываются основные особенности динамики стыковки космических аппаратов при его использовании.

## ПЕРЕНОС ХРУПКОГО ЦИЛИНДРА ДВУХПАЛЬЦЕВЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

**Ю.Ф. Голубев [1,2], Е.В. Мелкумова [2]**

[1]*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва*

elena_v_m@mail.ru

Исследуется задача об удержании хрупкого прямого кругового шероховатого цилиндра пальцами рук робота манипулятора. Каждый из пальцев имеет одну точку в контакте с цилиндром. Численно и аналитически получены возможные области расположения точек контакта на цилиндре, для которых существует решение задачи кинетостатики при переносе цилиндра двумя пальцами. Эта задача имеет аналогии задачам о равновесии многоногого шагающего робота на поверхности объекта цилиндрической формы или робота опирающегося на произвольную поверхность, точки подвеса ног которого на корпусе расположены на поверхности цилиндра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).

## Подсекция I-6. МЕХАНИКА КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

### УТОЧНЕНИЕ ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЯ ТЕСТОВЫХ СПУТНИКОВ

**С.Н. Алямовский[1], М.Ю. Беляев[1], Д.Н. Рулев[1], В.В. Сазонов[2]**

[1]*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва,Королёв*

[2]*Институтприкладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

sazonov@keldysh.ru

Измерения параметров орбитального движения тестового спутника применяются для уточнения индекса геомагнитной возмущенности $K_P$ . Тестовый спутник имеет форму сферы и постоянный баллистический коэффициент. Аппроксимация измерений параметров орбиты такого спутника решениями достаточно точных уравнений его движения позволяет уточнить индекс $K_P$ в российской модели плотности атмосферы, используемой для расчета действующей на спутник силы аэродинамического сопротивления. Такой подход обоснованрезультатами статистического моделированияи продемонстрирован при обработке данных измерений орбиты двух спутников «Сфера», запущенных с борта МКС в августе 2012г. и июле 2017г.

### РОЕВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОСПУТНИКОВ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ

**А. Анненкова[2], A.Mahfouz[1], К. Латышев[1], Д. Притыкин[1]**

[1]*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

[2]*Московский физико-технический институт, МО, Долгопрудный*

annenkova.ayu@phystech.edu

В работе описывается система ориентации и стабилизации наноспутников формата CubeSat 3U, проектируемых для отработки роевого взаимодействия. В миссии планируется задействовать четыре спутника, несущих детекторы для регистрации гамма-всплесков в качестве полезной нагрузки. В докладе обсуждаются режимы работы системы ориентации, состав которых определяется логикой функционирования спутников на орбите, а также алгоритмы, обеспечивающие эти режимы. Основной результат – алгоритм определения ориентации на основе распределённых измерений, информация о которых поступает с датчиков соседних аппаратов по межспутниковому каналу связи. Обсуждается топология межспутниковой связи в рое из большего количества аппаратов.

### СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ОГРАНИЧЕНИЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ОТДЕЛЕНИЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРАБЛЕЙ

**В.Н. Бакулин[1,2], А.С. Анфалов[3], Н.В. Богомолов[3],С.В. Борзых[3]**

[1]*Институт прикладной механики РАН, Москва*

[2]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

[3]*РКК «Энергия» им. С.П. Королева, Королев*

vbak@yandex.ru

Рассмотрен подход к статистическому исследованию области ограничений угловой скорости орбитальной станции, при которой транспортные корабли могут избежать столкновения с элементами конструкции нестабилизированной станции при экстренном отделении в аварийных ситуациях. Обоснована актуальность задачи, отмечены сложности реализации создания алгоритмов отделения. Указана определяющая роль математического моделирования в прогнозной оценке предельно допустимой скорости вращения. Описана технология получения вероятностных оценок успешности процесса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01410.

### СТРУКТУРА И БИФУРКАЦИИ СЕМЕЙСТВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ ГАМИЛЬТОНА

**А.Б. Батхин**

*Институт прикладнойматематикиим. М.В. Келдыша РАН, Москва*

batkhin@gmail.com

Рассматривается неинтегрируемая система Гамильтона с двумя степенями свободы, канонические уравнения которой инвариантны относительно конечной группы четвёртого порядка линейных преобразований расширенного фазового пространства. Изучается структура и бифуркации семейств двояко симметричных периодических решений. Доказывается, что в случае бифуркации удвоения периода в окрестности двояко симметричного решения всегда имеется два семейства однократно симметричных периодических решений удвоенного периода. Исследуются новые семейства двояко симметричных периодических решений задачи Хилла и ограниченной задачи трёх тел в случае равных масс.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00422а.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИКОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ПО ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

**Н.Д. Беклемишев[1], А.А. Богуславский[1], М.Ю. Беляев[2], О.Н. Волков[2], В.В. Сазонов[1], С.М. Соколов[1]**

[1] *Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2] *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, Королёв*

sazonov@keldysh.ru

Зрительные данные о колебаниях элементов конструкции МКС позволяют получить количественные характеристики этих колебаний. Такие характеристики находятся в результате анализа временных рядов, полученных прослеживанием на видеопоследовательностях объектов интереса в конструкции МКС. Числовые данные представляют собой выраженные в пикселях вертикальные и горизонтальные координаты в кадре выделенной точки элемента конструкции. Анализ полученных временных рядов позволяет восстановить реальную зависимость указанных координат от времени. Эта зависимость в ряде случаев носит колебательный характер и может быть представлена суммой конечного числа гармоник, амплитуды и частоты которых определяются с помощью спектрального анализа.

Работа поддержана грантомРФФИ № 17-01-00143 и грантом РНФ № 16-19-10705.

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛОБАЛЬНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ: ОПТИМИЗАЦИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК С УЧЕТОМ МОДЕЛИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ИНТЕРНЕТ-ТРАФИКА

**Ш.Н. Биктимиров, Н.С. Велиев, Д.А. Притыкин, А.А. Харлан**

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

shamil.Biktimirov@skoltech.ru

Предлагается модель, позволяющая оценить эффективность функционирования больших орбитальных группировок с точки зрения обеспечения требуемого интернет-трафика в соответствии с заданной моделью абонентов, а также с учётом инженерных ограничений, связанных с возможностями используемых космических аппаратов (КА). В качестве примера моделируется покрытие абонентов в крупных городах мира спутниками группировки Starlink (SpaceXcompany), включающей в себя около 12 тысяч КА, оборудованных активными фазированными антенными решетками (АФАР). Спутники разделяются на два эшелона с различными высотами, где в свою очередь расположены согласно определенному шаблону. Рассматривается возможность использования конфигураций группировок, обеспечивающих как равномерное покрытие, так и с приоритизацией районов с высоким спросом интернета.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕЛЕТА МЕЖДУ ОРБИТАМИ ВОКРУГ ТОЧЕК ЛАГРАНЖА L2ИL1 ВСИСТЕМЕ СОЛНЦЕ-ЗЕМЛЯ

**С.А. Бобер[1], С.А. Аксенов[1,2]**

[1]*Национальный Исследовательский Университет «Высшая Школа Экономики», Москва*

[2]*Институт космических исследований РАН, Москва*

sbober@hse.ru

В работе в рамках ограниченной круговой задачи трех тел исследованы траекторий перелета с гало-орбит в окрестности точки L2 на ограниченные орбиты в окрестности L1 в системе Солнце-Земля без применения корректирующих маневров. Предложена методика, основанная на численном интегрировании и расчете геометрических событий, при помощи которой рассчитаны возможности безымпульсных перелетов, классифицированы траектории перелетов, показана связь между амплитудами исходных гало-орбит, временами отлета, типами и амплитудами конечных орбит.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2019 году.

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЗАДАЧАМ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

**В.Н. Бранец[1,2]**

[1]*ОАО «Газпром – космические системы», Москва*

[2]*Томский государственный университет, Томск*

branets@gazprom-spacesystems.ru

Доклад предлагает подходы к задачам оптимизации структуры ракеты-носителя, предназначенного для выведения полезного груза на низкую орбиту ИСЗ.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ РАВНОВЕСИЙ СПУТНИКА С ПЕРЕМЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАСС

**А. А. Буров[1], И.И. Косенко[2]**

[1]*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва*

[2]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

kosenkoii@gmail.com

Рассматривается динамика относительного движения спутника с переменным распределением внутренних масс в центральном поле ньютоновского притяжения. В соответствии с так называемым спутниковым приближением предполагается также, что центр масс спутника движется по кеплеровой эллиптической орбите. Подбираются такие законы изменения распределения внутренних

масс, при выполнении которых существуют положения относительного равновесия известного вида. Для этих положений относительного равновесия исследуются в зависимости от параметров задачи необходимые условия устойчивости. Численно строятся соответствующие графические диаграммы.
Работа выполнена в ВЦ РАН, НИУ ВШЭ, МАИ.

## О ПРИБЛИЖЕННОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯОГРАНИЧЕННЫХ РЕШЕНИЙ В НЕКОТОРЫХ ИНТЕГРИРУЕМЫХ ЗАДАЧАХ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

**М.А. Вашковьяк**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

vashkov@keldysh.ru

В некоторых интегрируемых задачах небесной механики при построении аналитического решения возникают затруднения, связанные с обращением квадратур. Данная работа посвящена описанию приближенного полуаналитического метода их вычисления. Даны примеры нахождения аналитических зависимостей от времени переменных, изменяющихся в ограниченных пределах. Такими переменными являются различные орбитальные параметры. В компланарном случае двукратноосредненной задачи Хилла с учетом сжатия центральнойпланеты – это эксцентриситет эволюционирующей спутниковой орбиты, а в задаче о движении материальной точки в центральном силовом поле произвольной структуры - это расстояние от центра притяжения.

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ ОПАСНОГО АСТЕРОИДА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**П. Гуо[1], В.В. Ивашкин [1, 2], Ю.П. Кулешов [3]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

[3]*АО «Корпорация "Комета"», Москва*

869792831@qq.com

Рассмотрена задача определения и прогнозирования орбиты опасного астероида по данным космических оптических измерений с борта КА системы «Небосвод». Разработаны алгоритмы оптимальной обработки измерений и оценки точности определения параметров движения астероида с учетом случайных и систематических ошибок измерений, а также мешающих факторов, в том числе априорной информации о начальном состоянии астероида, ошибок модели его движения, ошибок знания движения КА. Выполнен анализ видимости и точности навигации системы «Небосвод» на основе моделирования наблюдения и измерений сближающихся с Землей астероидов Апофис, 2008 TC3 и Челябинского метеорита.

## РАСЧЁТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ФОТО-АППАРАТУРЫ ПРИ СЪЁМКЕ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С ПЛАТФОРМЫ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

**А.А. Давыдов[1]**

[1]*АО «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», Москва*

aleskey_ad@mail.ru

На борту космической станции (КС) готовится эксперимент по съёмке объектов космического мусора (ОКМ) с помощью фотоаппаратуры, установленной на поворотной платформе на борту КС. Поворотная платформа позволяет осуществлять программное 3-х осное вращение аппаратуры относительно КС. Рассматривается задача расчёта на участке съёмки программных значений кинематических параметров вращательного движения некоторой приборной системы координат, связанной с фотоприёмным устройством, относительно базовой системы координат, связанной с конструкцией КС.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00143.

## АНАЛИЗ СРЕДНИХ ДВИЖЕНИЙ СПУТНИКА-БАЛЛОНА В ПЛОСКОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ ЧЕТЫРЁХ ТЕЛ.

**А.В. Доброславский[1]**

[1]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва*

a.dobroslavskiy@gmail.com

Исследована эволюция орбит спутника-баллона во внешней сфере гравитационноговлияния Земли под действием сил светового давления и гравитационных возмущений со стороныСолнца и Луны, без учета эффекта земной тени. Получено среднее значение возмущающейфункции в условии отсутствии резонансов между средним невозмущенным движениемспутника и средними движениями Солнца и Луны. Показано, что интеграламиосредненных оскулирующих уравнений являются большая полуось орбиты спутникаи среднее значение возмущающей функции.
Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-01-00820.

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС В ОКРЕСТНОСТИ РЕЖИМОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРЕЦЕССИИ СПУТНИКА-ГИРОСТАТА

**А.В. Дорошин**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара*

doran@inbox.ru

Рассматривается динамика спутника-гиростата в окрестности режима цилиндрической прецессии на экваториальной орбите с эксцентриситетом. Спутник-гиростат обладает постоянным дипольным магнитным моментом. Эксцентриситет экваториальной орбиты влияет на изменение величины вектора магнитной индукции геомагнитного поля, создавая в рамках реализации орбитального движения спутника-гиростата гармонические возмущения в величине магнитного момента сил. Эти возмущения, в свою очередь, приводят к рождению хаотической динамики пространственного движения спутника-гиростата, обнаружение и исследование которой выполняется в настоящей работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ №19-08-00571-а.

## ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ГАРАНТИРОВАННОГО БАЛЛИСТИЧЕСКОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**Г.С. Заславский**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

zaslav@kiam1.rssi.ru

Представлен новый алгоритм расчета наибольшего момента времени, до которого гарантируется баллистическое существование космического аппарата (КА). Учитываются ошибки знания параметров текущего движения КА и моделей действующих на него сил. При построении алгоритма использованы современные методы прикладной небесной механики, вычислительной математики и определения расстояний до квадратичных многообразий (квадриков). Эффективность алгоритма подтверждена путем его сравнения с ранее используемым алгоритмом. В настоящее время представленный алгоритм успешно используется при баллистическом обеспечении полета КА по программе «РадиоАстрон».

## НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ КА «СПЕКТР-Р»

**М.В. Захваткин[1], В.А. Степаньянц[1], М.А. Капралов[1]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

zakhvatkin@kiam1.rssi.ru

Основу научной программы, выполняемой космической обсерваторией «Спектр-Р», составляют наблюдения в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинными базам (РСДБ) совместно с крупнейшими наземными радиотелескопами. Обработка таких наблюдений предъявляет высокие требования к точности навигации космического аппарата (КА). В данной работе мы описываем методику определения параметров движения КА «Спектр-Р», использованную для навигационной привязки научных экспериментов с КА. Для получения апостериорной оценки точности определения орбиты в работе анализируются результаты корреляционной обработки более 5000 РСДБ наблюдений с участием КА, полученных в течение 7 лет полета.

## РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА СОЛНЕЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ БЕЗ НАКОПЛЕНИЯ ГИРОСТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

**А.И. Игнатов[1]**

[1]*Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева, Москва*

general_z@mail.ru

Рассматривается режим солнечной ориентации искусственного спутника Земли. В этом режиме нормаль к плоскости солнечных батарей спутника неизменно направлена на Солнце, продольная ось лежит вблизи плоскости орбиты, абсолютная угловая скорость спутника весьма мала. Режим реализуется с помощью гиросистемы (двигателей-маховиков или гиродинов). Построен закон управления гиросистемой, позволяющий поддерживать продолжительную и достаточно точную солнечную ориентацию спутника при ограниченном изменении его гиростатического моментаза счет управления углом поворота спутника вокруг нормали к плоскости солнечных батарей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00143а.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ДВИЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ В РЕЖИМЕ ОДНООСНОЙ МАГНИТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

**А.И. Игнатов[1], В.В. Сазонов[2], Т.Ф. Барбашова[3]**

[1]*Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева, Москва*

[2]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

general_z@mail.ru

Исследовано вращательное движение осесимметричного искусственного спутника с постоянным магнитом в реальном магнитном поле Земли. Орбита спутника рассчитывается с учетом основных возмущающих факторов, дипольный момент спутника параллелен

оси симметрии. Построены установившиеся движения спутника, в которых эта ось составляет малый угол с вектором индукции магнитного поля. Показана возможность аппроксимации таких движений последовательностью периодических решений модифицированных уравнений движения. Составленная из таких решений последовательность аппроксимирует также спектр установившегося движения.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00143а.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ТРАЕКТОРИЙ КА С ДВИГАТЕЛЯМИ ОГРАНИЧЕННОЙ ТЯГИ

**А.Е. Ильин**

*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва*

ant8907@yandex.ru

Доклад посвящён методам оптимизации траекторий межпланетных перелётов космических аппаратов (КА) с двигателями ограниченной тяги. Нахождение оптимальных траекторий перелёта КА с двигателями ограниченной тяги осложняется высокой чувствительностью траекторий КА к вариациям неизвестных параметров краевой задачи. В докладе рассмотрены три метода решения краевых задач. Это метод продолжения по параметру, развитый в работах В.Г. Петухова, метод перебора неизвестных начальных условий краевой задачи с использованием последовательностей И.М. Соболя, а также метод компромиссного функционала, предложенный К.Г. Григорьевым.

## ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РОЕМ НАНОСПУТНИКОВ НА НИЗКОЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

**Д.С. Иванов[1], У.В. Монахова[1]**

[1]*Институт прикладной математикиим. М.В. Келдыша РАН, Москва*

danilivanovs@gmail.com

Работа посвящена решению ряда задач управления роем наноспутников с помощью аэродинамических сил на низкой околоземной орбите. Рассматриваются задачи формирования роя наноспутников после запуска, достижения относительного движения аппаратов роя внутри заданной области, управления плотностью распределения аппаратов в рое, а также задача предотвращения столкновений спутников. В работе предложены алгоритмы децентрализованного управления спутниками для решения перечисленных задач. Проведены исследования влияния возмущений и параметров системы на характеристики управляемого движения роя наноспутников.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00449_а.

## КОМПЛАНАРНЫЕ МЕЖОРБИТАЛЬНЫЕ ПЕРЕЛЕТЫ СВЯЗАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**В.А. Иванов, С.А. Купреев, Е.И. Байкова, В.С. Ручинский**

*МАИ (национальный исследовательский университет)*

2svr@mail.ru

Предложена стратегия формирования рациональных режимов управляемого движения космических тросовых систем. Установлены области начальных условий, в которых реализуются эти режимы. Разработаны показатели эффективности применения этих режимов для выполнения практических задач. Проведены исследования на примерах решения задач транспортного обслуживания (вывод космических объектов на орбиту, выполнение межорбитальных переходов, доставка грузов, сервисное обслуживание космических аппаратов, сбор крупных космических конструкций, уборка космического мусора и др.) с использованием различныхрежимов движения тросовых систем. Определены рациональные режимы.

## ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ОРБИТ У ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ

**А.В. Иванюхин**

*Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики МАИ, Москва*

*Российский университет дружбы народов, Москва*

ivanyukhin.a@yandex.ru

Рассматривается задача оптимального управления космическим аппаратом, находящимся на орбите у одной из коллинеарных точек либрации: гало-орбите или орбите Лиссажу. Приводится решение в двух постановках: непрерывного (идеально-регулируемый двигатель ограниченной мощности) и импульсного управления. В обоих случаях стоит задача минимизировать затраты топлива. При этом получая в синодической системе координат либо периодическое решение (для гало-орбит), либо квазипериодические орбиты. Последнее достигается введением некоторого «интегрального» ограничения. Приводятся примеры для системы Земля-Луна.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10429.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА АСТЕРОИДА АПОФИС

**В.В. Ивашкин[1, 2], А. Лан [2, 3], П. Гуо [1]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

[3]*Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, P.R. China*

ivashkin@keldysh.ru

Выполнен анализ орбитального движения спутника астероида Апофис с учетомвозмущений от давления солнечной радиации, притяжения удаленных небесных тел – Солнца, Земли, Луны, Венеры, Юпитера и несферичности астероида. Рассмотрены две модели астероида – двухосного удлиненного эллипсоида вращения и трехосного эллипсоида. Анализ выявил существование стабильных орбит спутника астероида, позволяющих в течение нескольких лет до сближения астероида с Землей в 2029 г. реализовать движение космического аппарата с радиомаяком вблизи астероида. Это дает принципиальную возможность провести с наземных пунктов радиотехнические измерения параметров движения спутника и уточнить орбиту Апофиса.

## АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ МАНЕВРОВ ПРИ ВЫВЕДЕНИИ КА НА ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКУЮ ОРБИТУ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА

**М. С. Константинов**

*НИИ прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института, Москва*

mkonst@bk.ru

При проектировании сложных схем межпланетного перелета с последовательностью гравитационных маневров, выполняемых у какой-либо планеты, необходимо оптимизировать порядки орбитального резонанса гелиоцентрических орбит, получаемых в результате этих маневров. Для транспортных операций, предполагающих существенное изменения наклонения орбит, есть возможность осуществлять гравитационные маневры в двух противоположных (по отношению к Солнцу) точках орбиты. Показано, что использование такой возможности в проекте исследования Солнца («Интергелио-Зонд») может существенно уменьшить время выполнения транспортной операции.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ(соглашение №16-19-10429).

## К ИССЛЕДОВАНИЮ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ВРАЩЕНИЙЭКЗО-ПЛАНЕТЫ В ЗАДАЧЕ N ТЕЛ

**П.С. Красильников**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

krasil06@rambler.ru

Исследуются собственные вращения экзо-планеты в задаче N тел в предположении, что траектории всех телсистемы квазипериодичны, отсутствуют резонансы, экзо-планетаявляется динамически-симметричным телом. Показано, что если базисные частоты всех траекторий – величины порядка единица, то усредненные уравнения вращений интегрируются. Исследованы движения вектора кинетического момента. Если совокупность базисных частот содержит малые параметры (медленно эволюционирующие орбиты), то усредненные уравнения неавтономны, интегралы исчезают. В частных случаях возможно появление новых интегралов, описывающих обобщенные законы Кассини.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00820.

## НАВЕДЁННЫЙ РЕЗОНАНСОМ МЕХАНИЧЕСКИЙ МОМЕНТ: ПОЛУЧЕНИЕ, АНАЛИЗ, ИЗМЕРЕНИЕ

**В.В. Любимов[1]**

[1]*Самарский национальный исследовательский университет, Самара*

vlubimov@mail.ru

Рассматривается задача о возмущённом неуправляемом спуске космического аппарата как твёрдого тела с малой асимметрией в атмосфере. Метод интегральных многообразий и метод усреднения применяются для получения наведённого резонансом момента. Целью работы является изучение нового малого механического момента, приводящего к значительным эволюциям угловой скорости космического аппарата на нерезонансных участках движения, прилегающих к резонансу. Представленное исследование содержит решение следующих задач: формирование методики получения момента, анализ его характерных особенностей, нахождение области действия и определение способов измерения наведённого момента.

## ПРЯМОЙ МЕТОД ЛЯПУНОВА В ЗАДАЧАХ ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

**Я.В. Маштаков, С.С. Ткачев, С.А. Шестаков**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

yarMashtakov@gmail.com

Предложен алгоритм одноосной стабилизации на основе прямого метода Ляпунова, который обеспечивает требуемое движение заданной оси аппарата. Проведена адаптациязакона управления при наличии стационарных ограничений на ориентацию аппарата,

описываемых в виде конусов, в которые не должна попадать заданная ось. Построенный алгоритм может порождать дополнительные положения равновесия, как неустойчивые, так и асимптотически устойчивые в случае, когда запретные области пересекаются. Предложена методика устранения неустойчивых положений равновесия, а также способ объединения запретных зон, позволяющий избежать появления асимптотически устойчивых положений равновесия. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-20117.

## ПОСТУПАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТРЕХОСНОГО ТЕЛА В НЕСТАЦИОНАРНОМ ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ

**М.Дж. Минглибаев[1], О.Б. Байсбаева[2]**

[1]*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

[2]*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

minglibayev@gmail.com

Получены дифференциальные уравнения поступательно-вращательного движения трехосного нестационарного тела в относительной системе координат с началом в центре нестационарного сферического тела. Приведены аналитическое выражение силовой функций ньютоновского взаимодействия трехосного тела переменной массы и размера с сферическим телом переменного размера и массы. Получены канонические уравнения возмущенного движения в аналогах элементов Делоне-Андуайе. Выполнены фактическое разложение возмущающей функции через элементы Делоне-Андуайе до второй гармоники включительно. Двойным осреднениям по быстрым переменным, в отсутствие резонанса, вычисляется вековая часть возмущающей функции.

## РАВНОБЕДРЕННЫЕ РЕШЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ ПЛОСКОЙ КРУГОВОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАДАЧИ ТРЕХ ТЕЛ

**М.Дж. Минглибаев[1], Т.М. Жумабек[2]**

[1]*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

[2]*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

minglibayev@gmail.com

Исследуется классическая плоская круговая ограниченная задача трех тел. Безразмерные дифференциальные уравнения движения написаны в барицентрической системе координат. Точные частные решения этихбезразмерных уравнений ищется в специальной форме. Найдены новые точные аналитические решения плоской круговой ограниченной задачи трех тел в форме равнобедренного треугольника переменной высоты, на вершине которого находится тело малой массы. Для определения безразмерной высоты равнобедренного треугольника получена интегрируемая система дифференциальных уравнений. На основе интеграла Якоби анализированы области возможных движении и определены начальные условия для найденных решений.

## ОДНОВРЕМЕННАЯ РАЗГРУЗКА МАХОВИКОВ И КОРРЕКЦИЯ ОРБИТЫ С УЧЕТОМ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ ТОПЛИВА

**А.С. Охитина, Я.В. Маштаков, С.С. Ткачёв, С.А. Шестаков**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

anna.ohitina@mail.ru

Работа посвящена проблеме поиска оптимального с точки зрения затрат топлива расположения двигателей орбитальной коррекции на геостационарном спутнике. При этом необходимо одновременно обеспечивать разгрузку избыточного кинетического момента маховиков и корректировать параметры орбиты, то есть соответствующим образом изменять характеристическую скорость в плоскости локального горизонта.Также допускается случай выхода из строя одного из двигателей, но при этом система должна сохранять свою работоспособность.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №17-71-20117.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**В.А Панкратов[1]**

[1]*Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

mathmod12@gmail.com

Рассматривается задача реконструкции неуправляемого вращательного движения космического аппарата (КА) по данным бортовых измерений его угловой скорости и магнитного поля Земли (МПЗ). Реконструкции такого рода необходимы для построения микрогравитационной обстановки на борту КА во время экспериментов с гравитационно-чувствительными процессами. Данные эксперименты могут иметь продолжительность в несколько суток, вследствие чего предложена методика, ориентированная на построение непрерывной реконструкции вращательного движения на продолжительных интервалах времени. Приведенный подход основан только на кинематических уравнениях вращательного движения и подходит для реконструкции как ориентированного, так и неориентированного режимов полета. Эта направленность отличает приведенные в работе алгоритмы от ряда известных способов построения реконструкций вращательного движения искусственного спутника Земли (ИСЗ) по данным бортовых измерений МПЗ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00143а.

## РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ И СГЛАЖИВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С КОНЕЧНОЙ ТЯГОЙ

**В.Г. Петухов**[1]

[1]*Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института, Москва*

vgpetukhov@gmail.com

Рассматриваются задачи оптимизации траекторий космических аппаратов с идеально-регулируемым двигателем ограниченной мощности и двигателем ограниченной тяги. Анализируется возможность улучшения сходимости методов решения задач оптимизации траекторий с двигателем ограниченной тяги за счет совместного использования сглаживающей аппроксимации релейной функции переключения тяги и регуляризирующего преобразования независимой переменной, растягивающего ее значения в окрестности моментов переключения тяги.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10429.

## РАЗВИТИЕ ИДЕИ Ф.А.ЦАНДЕРА О КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ С СОЛНЕЧНЫМ ПАРУСОМ

**Е.Н. Поляхова [1], В.С. Королев [2]**

[1,2] *Санкт-Петербургский государственный университет, с*

[1]pol@astro.spbu.ru, [2]vokorol@bk.ru

Рассматриваются история развития, основные этапы реализации и задачи полетов, математические модели динамики космических аппаратов с солнечным парусом для управления орбитальным движением и вращением всей конструкции при условии устойчивости заданной ориентации паруса относительно потока солнечных лучей. При исследованиях учитывается поведение решений в окрестности положений возможного равновесия или стационарных состояний движения, изменение устойчивости в зависимости от постановленных задач и уравнений, которые описывают процессы с учетом возмущений.

## ОБ УПРАВЛЕНИИ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ ОРБИТАМИ ОПАСНОГО АСТЕРОИДА И ЗЕМЛИ

**В.А. Прошкин[1], А.С. Чура[2]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

proschkin@mail.ru

В работе изучается возможность управления расстоянием между орбитами астероида и Земли с помощью коррекции орбиты астероида. Для варианта одноимпульсной коррекции найдено оптимальное направление импульса скорости в каждой точке орбиты астероида. В приближенной модели изучено влияние гравитационного поля Земли на расстояние между орбитами при близком пролете астероида.

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

**А.И.Разов [1], Е.С.Остропико [1], А.Г.Чернявский [2]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

[2]*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева, г. Королев*

razov@smel.math.spbu.ru

В докладе дан обзор применения сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в космической технике в России и за рубежом. Начиная с 60-х годов прошлого века, в хронологическом порядке представлены проекты устройств, в которых сплавы с ЭПФ использованы в рабочих элементах. Приведено описание большинства устройств с ЭПФ, которые в составе различных аппаратов участвовали в реальных космических полетах, начало которым было положено в 1982 году. Описаны проекты «КРАБ» (1989), «СОФОРА» (1991), «РАПАНА» (1993), «Clementine» (1994), Mars rover «Sojourner» (1997), «Insat 2E» (1999) и другие. Показаны современные направления исследований сплавов с ЭПФ применительно к космической технике.

## ГРАВИТАЦИОННАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ГРУЗОВЫХ КОРАБЛЕЙ ПРОГРЕСС МС-07 И ПРОГРЕСС МС-08

**Д.Н. Рулев[1], М.Ю. Беляев[1], Т.В. Матвеева[1], М.И. Монахов[1], В.В. Сазонов[2]**

[1]*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, г.Королёв*

dmitry.rulev@rsce.ru

[2]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

sazonov@keldysh.ru

Реконструировано неуправляемое вращательное движение кораблей *Прогресс* в режиме гравитационной ориентации. Режимы реализованы в апреле и августе 2018г. Реконструкция выполнена по измерениям угловой скорости корабля. Измерения, полученные на отрезках времени более 6 часов, обрабатывались совместно методом наименьших квадратов с помощью интегрирования уравнений вращательного движения корабля.Оценивались начальные условия движения и параметры математической модели. Реконструкция

проверялась по измерениям тока солнечных батарей. Корабли вращались вокруг своей продольной оси с угловой скоростью 0.1–0.2 град./с. Продольная ось совершает колебания относительно местной вертикали.
Проект РФФИ № 17-01-00143а.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАЗВОРОТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

**Я.Г. Сапунков[1], А.В. Молоденков[1]**
[1]*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*
molalexei@yandex.ru

Рассматривается классическая задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота космического аппарата (КА), как твердого тела произвольной динамической конфигурации, без ограничения на функцию управления при произвольных граничных условиях. В классе обобщенных конических движений произведена модификация задачи оптимального разворота, которая позволила получить ее аналитическое решение. Дается квазиоптимальный алгоритм разворота КА.Приводятся числовые примеры, показывающие, что полученное решение хорошо аппроксимирует решение классической задачи оптимального разворота КА. Среди примеров рассматриваются развороты Международной космической станции и КА “Спейс Шаттл”.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00205.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МИНИМАЛЬНОЙ ДЕГРАДАЦИЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙПРИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОМ ВЫВЕДЕНИИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНУЮ ОРБИТУ

**А.Е. Старченко**
*НИИ прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института, Москва*
aleksandr.starchenko@phystech.edu

В работе рассматривается метод снижения радиационной деградации солнечных батарей (СБ) космического аппарата при комбинированном выведении на геостационарную орбиту с помощью разгонного блока и электроракетной двигательной установки. Суть метода состоит в оптимизации формы траектории перелёта и аргумента перигея промежуточной орбиты.Применяется принцип максимума, максимизируется электрическаямощностьСБ на конец срока активного существования (САС). Явно получено решение сопряженного уравнения к дополнительной фазовой переменной — мощности СБ на конец САС.
Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда (соглашение №16-19-10429).

## ОБ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМОЙ

**А.А. Тихонов, А.П. Дериглазов, Л.Ф. Щербакова, А.Б. Яковлев**
*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
a.tikhonov@spbu.ru

Рассматривается электродинамическая тросовая система (ЭДТС) в околоземном космическом пространстве. Изучается проблема стабилизации ЭДТС в положении ориентации троса вдоль местной вертикали. Предлагается способ решения данной проблемы и соответствующее устройство. Для создания дополнительного восстанавливающего момента используются разноименно заряженные коллекторы на концах троса, а для создания активного управляющего момента диссипативного характера используются управляемые электронные эмиттеры, позволяющие изменять величину заряда на одном из коллекторов в соответствии с условиями, определяемыми текущей ориентацией троса.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00672.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**Д.А. Тучин[1]**
[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*
den@kiam1.rssi.ru

Предложены методы и алгоритмы определения орбиты космического аппарата на его борту с использованием измерений глобальных систем спутниковой навигации. Разработаны методы и алгоритмы приёма сигналов навигационных спутников на борту космического аппарата с использованием коррелятора. Представлены алгоритмы трёхэтапной обработки траекторных измерений, позволяющие повысить надёжность и точность решения навигационной задачи.

## ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ КА С ПРЯМОТОЧНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НА СВЕРХНИЗКИХ ОРБИТАХ

**А.С. Филатьев[1,2], А.А. Голиков[1], А.И. Ерофеев[1], О.В. Янова[2]**
[1]*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*
[2]*Московский авиационный институт (МАИ), Москва*
filatyev@yandex.ru

Рассмотрена задача комплексной оптимизации параметров компоновки космических аппаратов (КА)ипрямоточных воздушных электрореактивных двигателей (ПВЭРД), использующих забортные атмосферные газы в качестве рабочего тела для обеспечения

долгосрочного существования КАна сверхнизких орбитах (до 200 км).Построена физическая модельКА сПВЭРД, которая включает описание внешнего обтекания КА, молекулярного потока через ПВЭРД и системы электропитания. Выявлен безразмерный обобщенный параметр, который определяет возможностькомпенсации аэродинамического сопротивления в условиях вариаций плотности и состава атмосферы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕТРАЭДРАЛЬНОЙ ФОРМАЦИИ СПУТНИКОВ НА НИЗКОЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

**С.А. Шестаков, Я.В. Маштаков**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

shestakov.sa@gmail.com

В работе решается задача получения начальных данных для построения группировки из четырёх спутников, сохраняющих форму в орбитальной системе отсчёта в линейном приближении. Предложена методика построения опорных относительных орбит в линейном приближении, исследована динамика формации в нелинейной модели, включающей вторую поправку от нелинейной модели гравитационного поля, эксцентриситета орбиты и второй зональной гармоники. Произведена оптимизация полученных решений. Для поддержания формации предлагается использовать прямой метод Ляпунова, где в качестве управления рассматриваются аэродинамические силы.

## РАСЧЕТ ОКОЛОЛУННОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОРБИТЫ

**М.И. Шпекин, А.А. Семенов, Б.А. Епишин**

*Казанский федеральный университет, Казань*

michaelS1@yandex.ru

Рассмотрена задача определения параметров селеноцентрической орбиты, когда положения объекта на орбите находятся из фотограмметрического решения. На примере движения космического корабля «Зонд-8» представлены расчеты параметров селеноцентрической орбиты по измерениям опорных точек лунных каталогов, опознанных на орбитальных снимках. Выполнен предварительный анализ полученных элементов орбиты, из которого следует, что фотограмметрическая орбита, рассчитанная по большой дуге, заметно отличается от орбиты, найденной по малой дуге. При этом наибольшее различие наблюдается в таких элементах как средняя аномалия $\mathbf{M_0}$ и ее большая полуось **a.**

## К ВОПРОСУ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССИВНОГО ИНСПЕКЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКА В НОРМАЛЬНОМ ПОЛЕ ПРИТЯЖЕНИЯ

**М.С. Щербаков**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара*

sherbakov.m.s@mail.ru

В работе рассмотрено пассивное инспекционное движение одного КА относительно другого при учёте второй зональной гармоники потенциала поля притяжения Земли. Движение рассматривается в орбитальной системе координат, связанной с ведущим КА, движущимся по круговой орбите вне атмосферы Земли. Инспекционный эллипс соответствует известным уравнениямClohessy-Wiltshire. Под воздействием возмущений пассивное движение будет отличаться от инспекционного. Моделирование показало, что выбором начальных условий движения обоих КА можно существенно снизить возмущения инспекционного движения. Выполнено исследование устойчивости возмущённого движения, которое подтвердило сделанные выводы.

## ВЛИЯНИЕ ВОЛН И КОЛЕБАНИЙ НА ДИНАМИКУ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

**А.А. Малашин[1,2], П.А. Дьяков[1]**

*[1]Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.*

*[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

Интерес к теоретическим исследованиям и экспериментам по применению тросовых систем в условиях космоса обусловлен тем, что подобные системы – эффективный способ совершения орбитальных маневров, перемещения полезной нагрузки без затрат топлива. Также они могут применяться для удаления нежелательных объектов с используемых орбит (элементов космического мусора, устаревших космических аппаратов, отработанных частей систем и др.). В работе изучаются проблемы волновых и колебательных движений, когда сложное совместное взаимодействие частей системы приводит к возникновению в тросе продольно-поперечных колебаний, оказывающих существенное влияние на динамику системы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00225.

## Подсекция II-1. ГИДРОДИНАМИКА

### ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ В МИКРОКАНАЛАХ

**О.А. Абрамова[1], А.И. Искандаров[1], Ю.С. Замула[1], Э.С. Батыршин[1], Ю.А. Питюк[1], Н.А. Гумеров[2]**

[1]*Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский государственный университет, Уфа*

[2]*University of Maryland, Institute for Advanced Computer Studies, USA*

abramovacmndds@gmail.com

Работа посвящена исследованию особенностей гидродинамических потоков в областях сложной геометрии (микроканалах с шероховатостями различной формы и масштаба, а также в каналах переменного сечения с гладкими стенками) с помощью компьютерного дизайна, основанного на применении эффективных алгоритмов (метод граничных элементов, быстрый метод мультиполей) и высокопроизводительных вычислительных систем (CPU+GPU), а также посредством проведения физических экспериментов с использованием современного оборудования.В рамках работы проведены лабораторные и численные эксперименты с целью анализа и сопоставления полученных картин гидродинамических потоков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20102.

### ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДВУМЕРНОЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ В ЭЙЛЕРОВЫХ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

**А.В. Аксенов[1], К.П. Дружков[1]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

aksenov@mech.math.msu.su, Konstantin.Druzhkov@gmail.com

Рассмотрены системы уравнений двумерной мелкой воды над неровным дном в эйлеровых и лагранжевых переменных. Введена в рассмотрение промежуточная система уравнений, одновременно описывающая решения систем уравнений в эйлеровых и лагранжевых переменных. Найдены все гидродинамические законы сохранения промежуточной системы уравнений. Получена связь между законами сохранения промежуточной системы уравнений и законами сохранения систем уравнений двумерной мелкой воды в эйлеровых и лагранжевых переменных. Получен новый дополнительный базовый закон сохранения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00890 и Фонда развития физики и математики БАЗИС (стипендиат К.П. Дружков).

### ДВИЖЕНИЕ ЖИДКИХ СРЕД ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ НА СТЕНКАХ КАНАЛА

**В.К. Андреев[1], Е.Н. Лемешкова [1]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

andr@icm.krasn.ru

Изучены однонаправленные и двумерные движения двух несмешивающихся жидкостей с общей границей раздела в плоском горизонтальном слое. При этом на нижней неподвижной стенке поддерживается заданное распределение температуры, а верхняя твёрдая стенка может быть, как теплоизолированной, так и нет. В случае двумерного движения на общей поверхности раздела учтено влияние изменения межфазной энергии. Возникающие сопряжённые краевые задачи являются обратными относительно градиентов давлений вдоль канала. Приведены результаты расчётов, показывающие различные способы управления движением с помощью задания температуры на стенках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00229.

### НЕЛИНЕЙНЫЕ АЭРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ С ОТБОРОМ МОЩНОСТИ

**П.Р. Андронов, С.В. Гувернюк**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

andronov.peter@yandex.ru

В полной сопряжённой постановке исследуется задача о поперечных автоколебаниях цилиндров с вязкоупругими связями в неограниченном потоке вязкой несжимаемой жидкости. Используется бессеточная безытерационная вычислительная технология ВВД. Воспроизведены затухающие свободные колебания цилиндра под действием упругой связи в покоящейся жидкости и незатухающие автоколебания в потоке. По мере приближения собственной частоты колебаний цилиндра в жидкости к гидродинамической частоте зарождения вихрей дорожки Кармана происходит резонансный рост амплитуды автоколебаний. Пара цилиндров может совершать более интенсивные автоколебания, чем один.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-31-20057).

## УРАВНЕНИЯ КЕЛЬВИНА-ФОЙГТА С p-ЛАПЛАСИАНОМ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

**С.Н. Антонцев**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

antontsevsn@mail.ru

В докладе рассматривается начально-краевая задача для обобщенных уравнений Кельвина-Фойгта для несжимаемой и неоднородной анизотропной неньютоновской жидкости. Плотность такой жидкости является неизвестной функцией и удовлетворяет гиперболическому уравнению переноса, что принципиально усложняет задачу по сравнению даже с изотропной несжимаемой однородной жидкостью. Насколько нам известно, математические вопросы уравнений Кельвина–Фойгта для неоднородной несжимаемой жидкости ранее не рассматривались. Уравнения также содержат нелинейные члены с анизотропнымр-Лапласианом, описывающие вязкопластические (и вязкоупругие) свойства жидкости и нелинейные члены, описывающие источники или стоки. Доказано существование сильных и слабых решений локальных и глобальных по времени. Исследовано также асимптотическое поведение решений по времени и их качественные свойства.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-11-00069.

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

**О.В. Антонова[1], А.И. Боровков[1], Ю.Я. Болдырев[1], И.Б. Войнов[1]**

[1] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

antonova_ov@spbstu.ru

Исследование посвящено вопросам профилирования микрогеометрии смазочного слоя гидродинамических подшипников скольжения. Рассматриваются секторные подшипники с профилями в виде карманов Рэлея. Приведено решение задачи параметрической оптимизации по построению технологичных в изготовлении профилей исходя из условия максимума подъемной силы. При этом впервые для решения подобной задачи использовались передовых программные комплексы ANSYS/CFX и IOSO. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании широкого класса подшипников скольжения, применяемых в различных энергетических установках.

## ДИНАМИКА ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ДВУХ НЕГЛУБОКИХ СЛОЕВ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПЛОСКОМ НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

**Д.Г. Архипов, Г.А. Хабахпашев**

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

theory@itp.nsc.ru

Показано, что задача устойчивости двухслойного течения Пуазейля в наклонном канале формально сводится к более простой и исследованной ранее задаче для случая горизонтального канала с отличием в форме профиля стационарного потока. Исследовано влияние наклона канала на профиль и установлены области параметров задачи, при которых таким влиянием можно пренебречь. Методом сопряженного оператора выведено нелинейно-дисперсионное эволюционное уравнение для моделирования динамики возмущений границы раздела жидкостей и показано, что при малой относительной разнице плотностей жидкостей (и, соответственно, малой скорости внутренних гравитационных волн) возможна накачка волн энергией стационарного потока.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (**АААА-А17-117022850024-4**).

## ВИХРЕВАЯ ТРУБКА РАНКА. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ. МЕХАНИЗМ ЭФФЕКТА РАНКА

**Д.Г. Ахметов[1], Т.Д. Ахметов[2,3], В.А. Павлов[4]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,г. Новосибирск*

[2]*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,г. Новосибирск*

[3]*Новосибирский государственный университет,г. Новосибирск*

[4]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск*

akhmetov@hydro.nsc.ru

Экспериментально изучена структура закрученного течения в вихревой трубке Ранка. Измерено поле скорости этого течения и построена картина линий тока в осевом сечении трубки, дающая достаточно полное представление о структуре течения в трубке Ранка. На основе выявленной структуры течения предложена новая качественная модель, объясняющая эффект Ранка, т.е. физический механизм истечения из трубки Ранка охлажденного и нагретого газовых потоков.

## ЧИСЛЕННЫЕ СХЕМЫ РАСЧЕТА КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

**Н.Д Байков[1], А.Г. Петров [2]**

[1]*Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского, Москва*

baikov_nd@rambler.ru

В работе предлагается численный метод расчета формирования тонких кумулятивных струй на свободной границе идеальной жидкости под действием потенциальных течений в плоском случае. Алгоритм основан на методе граничных элементов. Основные

уравнения задаются на свободной границе, а при дискретизации используются аппроксимации без насыщения в смысле Бабенко. Также теоретически исследуются такие вопросы, как сохранение площади, энергии, импульса, момента количества движение, влияние циркуляции.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-19-01633.

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ОХЛАЖДЕНИИ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ

**В.А. Батищев [1]**

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

batishev-v@mail.ru

Изучены стационарные режимы осесимметричных термогравитационных течений неоднородной жидкости в пограничном слое в окрестности неравномерно нагретой (охлажденной) свободной границы. На основе уравнений движения в приближении Обербека-Буссинеска показано, что в результате бифуркации при локальном охлаждении свободной границы может возникать один из двух возможных вращательных режимов течений жидкости в пограничном слое. Вне этого слоя жидкость не закручена. Изучено влияние эффекта Марангони на динамику режимов течений жидкости. Построена асимптотика вращательных режимов вблизи точки бифуркации. Результаты работы могут объяснить одну из причин возникновения торнадо.

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА

**В.Б. Бекежанова[1], О.Н. Гончарова [2]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

[2]*Алтайский государственный университет, Барнаул*

vbek@icm.krasn.ru

В рамках сопряжённой задачи изучается динамика тепломассообмена в двухслойной системе жидкость – газ при нагреве тепловым источником, помещённым на верхнюю или нижнюю стенку кюветы. Для описания движения сред используются уравнения Обербека – Буссинеска, записанные в терминах «функция тока – завихренность». На межфазной поверхности формулируются условия сопряжения, учитывающие материальный характер границы раздела. С помощью оригинального численного метода проводится моделирование конвекции, анализируются топология возникающих течений, структура теплового поля и характер деформаций межфазной границы.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Красноярского края № 18-41-242005.

## СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАКЛОННОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

**В.Б. Бекежанова [1], О.Н. Гончарова[2]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

[2]*Алтайский государственный университет, Барнаул*

gon@math.asu.ru

Работа посвящена теоретическому исследованию двухслойных течений с фазовым переходом на границе раздела в трехмерном случае. На основе уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека – Буссинеска разработана математическая модель, в которой учтено влияние эффектов Соре и Дюфура. Точное решение определяющих уравнений (обобщение решения Остроумова – Бириха), имеющее групповое происхождение, позволяет описать режимы испарительной конвекции в горизонтальном канале в условиях действия наклонного градиента температуры.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Красноярского края № 18-41-242005.

## ДИНАМИКА ДВУХСЛОЙНЫХ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАГРЕВЕ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**В.Б. Бекежанова [1], О.Н. Гончарова[2], Д.С. Клюев [3], Н.А. Иванова [3]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

[2]*Алтайский государственный университет, Барнаул*

[3]*Тюменский государственный университет, Тюмень*

gon@math.asu.ru

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию эволюции двухслойной системы несмешивающихся жидкостей, находящейся под действием локальной тепловой нагрузки за счет нагрева лазерным пучком. Представлены математическая модель, методы опытного и численного исследования термокапиллярной деформации жидких слоев, и сравнение аналитических и экспериментальных результатов.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00291.

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ИСПАРЕНИЕМ

**В.Б. Бекежанова[1], И.А. Шефер [2]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

[2]*Институт математики и фундаментальной информатики, Сибирский федеральный университет, Красноярск*

vbek@icm.krasn.ru

Работа посвящена исследованию линейной устойчивости совместного течения испаряющейся жидкости и спутного потока парогазовой смеси относительно малых пространственных возмущений. Двухслойное течение в плоском горизонтальном канале описывается точным решением групповой природы уравнений конвекции. Получены критические характеристики устойчивости, определяющие пороговые тепловые нагрузки, для систем с различной толщиной жидкого слоя. Проведена селекция мод, представлены типичные формы наиболее опасных трёхмерных возмущений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00291.

## ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД В ОБТЕКАНИИ ТОНКОЙ ПЛАСТИНКИ ПОТОКОМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**Я.А. Бердник[1], М.А. Сумбатян [2]**

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

[2]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

yaninaberdnik@mail.ru

Предлагаемый метод основан на итерационной схеме для возмущений относительно основного потока в качестве нулевого приближения. Возмущения на каждом последующем итерационном шаге предполагаются малыми по сравнению с предыдущими приближениями, и по этим возмущениям производится линеаризация. На каждом шаге решается интегральное уравнение относительно силы вязкого трения вдоль пластинки. Решение на каждой итерации сравнивается с классическим решением Блазиуса и расчётом в среде ANSYS CFX. Первая и вторая итерации обеспечивают достаточно высокую степень точности.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 9.5794.2017/БЧ.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НА ПЛАВЛЕНИЕ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ВНУТРИ ПАРАФИНА

**Н.С. Бондарева, М.А. Шеремет**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

bondarevans@mail.tsu.ru

Использование скрытой энергии плавления для охлаждения и сохранения энергии широко распространено в современных технологиях. В охлаждающих установках используются различные солевые растворы, металлические сплавы и органические соединения. При невысоких температурах в качестве материалов с фазовыми переходами «твердое тело – жидкость», как правило, используются жирные кислоты или парафины. Данная работа посвящена численным исследованиям процессов плавления и кристаллизации парафина внутри радиаторной системы при периодическом нагревании от источника объемного тепловыделения. Решалась нестационарная сопряженная задача плавления и естественной конвекции внутри замкнутой прямоугольной области. Уравнения в переменных «функция тока – завихренность – температура» в обезразмеренном виде решались с использованием конечно-разностной схемы второго порядка точности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента для молодых ученых МК-1934.2019.1.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СВОБОДНОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

**О.А. Бурмистрова[1]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

oksanabur@mail.ru

Рассматривается задача о свободной жидкой пленке, ограниченной по вертикали твердыми стенками и находящейся под действием силы тяжести и термокапиллярных сил. Если угол смачивания равен $\pi/2$, то система уравнений, полученная в приближении тонкого слоя, имеет решение, при котором толщина пленки постоянна, а температура является линейной функцией продольной координаты. Данное решение исследуется на устойчивость аналитически методом Вишика – Люстерника и численно методом ортогонализации Годунова – Абрамова. Аналитические и численные результаты хорошо согласуются. Решение неустойчиво, но инкремент возмущений является малым даже при земной гравитации.

## УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ НА ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

**Р.Д. Вахитова, Е.И. Могилевский**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

vakhitovard@gmail.com

Исследуется стекание тонкой пленки неньютоновской жидкости по наклонной осциллирующей плоскости под действием силы тяжести. Рассматриваются гармонические колебания, при которых плоскость движется поступательно. Изучены свойства безволнового течения. Для произвольного обобщенно ньютоновского реологического закона выведены эволюционные уравнения, описы-

вающие динамику длинных волн, частота которых много меньше частоты колебаний. Рассмотрены модели ньютоновской и степенной жидкости. Изучена линейная устойчивость безволнового течения, показано, что осцилляции плоскости стабилизируют течение.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-00049.

## ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ О ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАДАННОМ ЗАКОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ

**С.С. Власова[1], М.Г. Храмченков [2]**

[1]*АО «Казанское ОКБ «Союз», Казань*

[2]*Казанский федеральный университет, Казань*

sveta040790@yandex.ru

Рассмотрено стационарное точное решение системы Обербека-Буссинеска, описывающее естественную конвекцию вязкой несжимаемой жидкости в плоском слое при квадратичном нагреве нижней границы (в работе рассматривается четыре вида нагрева нижней границы). Выявлены закономерности в распределении гидродинамических полей между нагревами, найдены оценки параметров безразмерных чисел подобия для каждого типа нагрева, соответствующие противотечениям, застойным зонам. Изолинии температуры для четырех краевых задач всегда имеют локально гиперболический или локально параболический вид. Для давления в первой и второй краевой задачи наблюдаются локально эллиптические (замкнутые) изолинии.

## МНОГОПАЛУБНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЗАДАЧАХ ОБТЕКАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С МАЛЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

**Р.К. Гайдуков, В.Г. Данилов**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

roma1990@gmail.com

В докладе приводится детальное описание нестационарных двухпалубных и трехпалубных структур пограничного слоя. А именно, рассматривается нестационарная задача обтекания вязкой несжимаемой жидкостью полубесконечной пластины с малыми периодическими неровностями при больших значениях числа Рейнольдса. Построено формальное асимптотическое решение, имеющее двух- или трехпалубную структуру пограничного слоя, в зависимости от масштабов неровности. Полученные уравнения для членов асимптотического решения исследованы аналитически и численно. Приведены результаты численного моделирования течения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

## ОБРАЗОВАНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

**А.М. Гайфуллин [1], Д.А. Гаджиев [1], В.В. Жвик [1], А.В. Зубцов [1]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

gaifullin@tsagi.ru

Представлено решение нескольких задач, связанных с образованием и взаимодействием протяженных вихревых структур. Построено точное решение уравнений Эйлера для крыла малого удлинения. При симметрии набегающего потока на такое крыло возможны симметричные и несимметричные отрывные образования около него. Получены решения уравнений Навье-Стокса для двух взаимодействующих закрученных струй и для течения сжимаемого газа около вращающегося цилиндра. Решена модельная задача о растяжении вихревых нитей в турбулентной жидкости, которое происходит в стационарных условиях на масштабах от колмогоровского до масштаба турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00163.

## ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ КАРТИН ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В МИКРОСТРУКТУРАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

**А.В. Гимадеев, О.А. Абрамова, Ю.А. Питюк**

*Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,*

*Башкирский государственный университет, Уфа*

gimahat1911@mail.ru

В работе представлены результаты трехмерного численного моделирования картин течения вязкой жидкости вокруг микроструктур различной конфигурации с использованием ускоренного гетерогенным быстрым методом мультиполей метода граничных элементов. Такой подход позволяет проводить крупномасштабные расчеты на персональной рабочей станции. Разработана триангуляция поверхностей рассматриваемых объектов и проведен расчет гидродинамических потоков вокруг цилиндрических недеформируемых неподвижных элементов, окруженных с четырех сторон твердыми стенками. Варьировался размер и количество элементов, а также их взаимное расположение. Проанализированы полученные картины течения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-549.2019.1.

## ГИДРОДИНАМИКА ПЛАВЯЩИХСЯ ЧАСТИЦ

**А.Н. Голубятников [1,2], О.О. Иванов[1]**

[1]*Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2] *МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

ivanov@imec.msu.ru

В работе рассматривается автомодельное движение плавящейся частицы в собственном вязком несжимаемом расплаве. Для малых чисел Прандтля тепловая задача решается отдельно от механической, выводится сила, действующая на частицу со стороны расплава. Результаты прилагаются к движению броуновской плавящейся частицы. Обнаружено, что для определенных перепадов температур наличие реактивной силы может серьезно менять характер движения, делая его взрывообразным. Для описания движения континуума плавящихся частиц найдены термодинамические параметры такой смеси, с помощью которых выведены уравнения движения смеси в предположении малой концентрации частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00037.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ РАДИАЛЬНОЙ ПРОПИТКЕ

**В.Г. Гришаев, О.В. Лебедев, С.Г. Абаимов, Б.Н. Гильмутдинов и И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов,*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

v.grishaev@skoltech.ru

В нашей работе мы экспериментально исследовали гипотезу о присутствии краевого течения при радиальной пропитке, используемой в измерениях ненасыщенной проницаемости армирующих волоконных преформ. Чтобы проанализировать фронт пропитки одновременно на границе раздела преформа/оснастка и внутри преформы, мы разработали оптическую методику, регистрирующую одновременно свет, отраженный от преформы и прошедший сквозь неё. Во время пропитки преформ толщиной от 0.22 до 7 мм из стеклоткани полотняного переплетения и объемной доли волокна 54.4%, было обнаружено краевое течение. Вклад краевого течения в измеряемую проницаемость увеличивался с ростом толщины преформы.

## ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ОТРЫВНОГО ПОТОКА

**И.А. Давлетшин[1,2], Н.И. Михеев [1]**

[1]*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Казань*

davlet60@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования структуры отрывного потока воздуха в канале за выступом при вынужденных пульсациях расхода. Показано, что характерной особенностью таких течений является периодическое образование крупномасштабных вихрей в отрывной области. Частота их образования равна частоте вынужденных пульсаций потока. Вихри приводят к интенсификации процессов переноса в потоке. В частности, наблюдался рост теплоотдачи, особенно в ближнем следе за выступом. Установлен эффект заметного сокращения длины отрывной области (до двух раз) на пульсирующих режимах течения. Предложена классификация течений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-48-160030.

## НЕСТАНДАРТНЫЕ КАУСТИКИ ДЛЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ДВУМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ С ПРИЛОЖЕНИЯМИ К ЗАДАЧЕ О РАСПРОСТРАНЕНИИ И НАБЕГЕ ВОЛН НА БЕРЕГ

**С.Ю. Доброхотов [1], В.Е. Назайкинский[2]**

[1,2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[1,2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область*

[1] dobr@ipmnet.ru, [2] nazaikinskii@yandex.ru

Обычное квазиклассическое приближение непосредственно не применимо к линеаризованным двумерным уравнениям мелкой воды с локализованными начальными данными, описывающим длинные волны (например, волны цунами) в ограниченном бассейне переменной глубины, поскольку импульсные переменные на лучах геометрической оптики становятся бесконечными на границе области. Квантование Фока регуляризующего геометрию канонического преобразования приводит к преобразованию Ганкеля. Оно используется в конструкции модифицированного канонического оператора Маслова, дающего асимптотические решения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-11-10282.

## СВОЙСТВА ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ И СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТЕЛА ПРИ ИХ НЕСТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ

**Г.Я. Дынникова**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИ механики*

dyn@imec.msu.ru

Рассматривается связь гидродинамических сил, действующих на поверхности, с эволюцией завихренности в вязкой жидкости. Введены понятия тензора переноса завихренности и потока завихренности в трехмерных течениях. Силы, действующие на тела, выражены через потоки завихренности с поверхности. Выведено интегральное уравнение, определяющее распределение плотности этих

потоков. Показано, что оно может быть представлено в виде суммы распределений, одно из которых соответствует движению без ускорения, а каждое из остальных линейно зависит только от одной компоненты ускорения. В результате доказано, что тензор присоединенных масс зависит только от формы тела и наличия обтекаемых поверхностей вблизи него.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАШУЩИХ ПРОФИЛЕЙ И КРЫЛЬЕВ БЕССЕТОЧНЫМИ МЕТОДАМИ

**Я.А. Дынников, Г.Я. Дынникова, Т.В. Малахова, Д.А. Сыроватский**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИ механики*

rosik.ru@gmail.com

Разработаны методы моделирования обтекания машущих органов движения квазибиологических объектов и их локомоции в сопротивляющейся среде. Для моделирования двумерных течений используется метод вязких вихревых доменов, на основе которого решается сопряженная задача самодвижения трехзвенного профиля, имитирующего движение рыбки. Для трехмерных задач используется метод дипольных доменов. Рассматривается комбинированное движение прямоугольной пластины, состоящее из угловых и поступательных колебаний, а также машущие движения с угловыми колебаниями пары пластин, имитирующих крылья насекомого.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-00133.

## ЛИНЕЙНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ВОЛНОВЫХ АТТРАКТОРОВ

**Е.В. Ерманюк[1], И.Н. Сибгатуллин [2], К. Брузе [3], Т. Доксуа [4]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*

[3]*Институт исследования неравновесных явлений, Марсель, Франция*

[4]*Лаборатория физики Высшей Нормальной Школы г. Лиона, Лион, Франция*

ermanyuk@hydro.nsc.ru

В докладе представлены результаты цикла работ по экспериментальному и численному исследованию линейной и нелинейной динамики аттракторов внутренних и инерционных волн. Обсуждаются следующие проблемы: сценарий развития волновой турбулентности в результате каскада триадных волновых взаимодействий, линейный и нелинейный скейлинг для ширины волновых пучков, генерация вторичных течений, особенности формирования волновых аттракторов в плоской и пространственной задачах, гео- и астрофизические приложения.

Работа выполнена в рамках госзадания №0149-2019-0004 и темы госбюджетных исследований №III.22.4.3.

## О КАЧЕНИИ ТЕЛ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

**В.А. Ерошин, А.В. Бойко**

*НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

bandmail@mail.ru

Долгое время споры о целесообразности использования качения тел по поверхности воды в транспортных целях оставались чисто риторическими, хотя первый патент был выдан Д. Вандербургу еще в 1888 году [1-4]. Однако, в последние годы многочисленные случаи катания по воде на багги, снегоходах и мотоциклах [5,6] заставляют нас подумать о практическом использовании этой идеи. В докладе описаны условия качения по воде колесных систем с грунтозацепами, проведено моделирование этого явления, получены зависимости осадки и несущей способности колес от числа Фруда для ряда значений безразмерной массы системы, а также дана оценка положения границы области устойчивого качения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00807

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ПЛАСТИЦИРУЮЩЕГО ЭКСТРУДЕРА И ВЫХОДНЫХ АДАПТЕРЫХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

**С.В. Ершов[1], Н.М. Труфанова [1]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

ershov_sv@bk.ru

В данной работе рассмотрены две пространственные модели каналов зоны дозирования пластицирующего экструдера с выходными адаптерами конической и прямоугольной формы. Использование предложенных моделей позволило рассмотреть процессы течения и теплообмена расплава полимера одновременно в двух функциональных зонах экструзионного оборудования и оценить их взаимное влияние на поля скоростей, температур, скоростей сдвига, вязкости и линии тока. В результате численных исследований процессов тепломассопереноса в выходных адаптерах различной формы были определены: закономерности течения полимера, застойные области с вихревым движением материала, и рациональная форма адаптера.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГРАНИЦ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

**В.П. Житников, Н.М. Шерыхалина, А.А. Зарипов**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

zhitnik@mail.ru

Основным вопросом, рассматриваемым в данной работе, является объяснение образования заострений на подвижной границе при электрохимической обработке, что невозможно с точки зрения идеальной модели электрохимического формообразования. При исследовании нестационарного процесса на каждом шаге по времени решаются три задачи: конформного отображения области параметрической плоскости на физическую и на плоскость комплексного потенциала и определения сдвига точек границы для перехода к следующему шагу. В результате исследования показано, что увеличение кривизны выпуклой части подвижной границы получается при учете переменности потенциала границы, что характерно для реального процесса обработки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00356.

## НОВЫЕ КЛАССЫ РЕШЕНИЙ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ПЕРЕМЕННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

**А.И. Журов[1], А.Д. Полянин[1]**

[1] *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

zhurov@ipmnet.ru

Рассматривается уравнение плоского пограничного слоя с переменной вязкостью, к которому путем введения функции тока сводятся уравнения нестационарного осесимметричного гидродинамического пограничного слоя с градиентом давления. Для построения точных решений применяется модифицированный метод функционального разделения переменных, использующий две или три дифференциальные связи. Получены новые классы точных решений уравнений плоского и осесимметричного нестационарного пограничного слоя, содержащие несколько произвольных функций.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№№ госрегистрации АААА-А17-117021310385-6 и АААА-А17-117021310375-7).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ПРИ ЗАКАЧКЕ ТЕПЛОГО ГАЗА

**М.Н. Запивахина[1]**

[1]*Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск*

zapivakhina-marina@rambler.ru

В данной работе рассматривается задача разложения газового гидрата при нагнетании теплого газа в пористый пласт. Представлена математическая модель для данного процесса и приведено автомодельное решение этой задачи. Математическое моделирование процесса разложения гидрата в пористом пласте позволяет провести анализ влияния температуры и давления закачиваемого газа, а также исходных характеристик пласта (пористости, проницаемости, гидратонасыщенности, температуры, давления) на поля температуры и давления, а также на положение подвижной границы, определяющей зону разложения гидрата.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ С ЭФФЕКТОМ СОРЕ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**Н.А. Зубова[1], Т.П. Любимова [1, 2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

zubova.n@icmm.ru

Численно исследованы возникновение и нелинейные режимы термоконцентрационной конвекции смеси додекана, изобутилбензола и тетралина в прямоугольной области пористой среды с твердыми непроницаемыми для вещества границами при нагреве снизу.Найдено, что при некотором значении числа Релея в полости возникает стационарное движение, которое при росте числа Релея сменяется колебательным. При дальнейшем увеличении числа Релея возникают хаотические колебания. Обнаружено несколько монотонных и колебательных режимов, характеризующихся разными пространственными масштабами.

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ ГАЗАС СУЩЕСТВЕННО РАЗЛИЧНЫМИ ПЛОТНОСТЯМИ

**К.И. Зырянов[1], В.Я. Рудяк[1,2,3], Г.А. Руев[1]**

[1]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

[2]*Новосибирский государственный университет*

[3]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

valery.rudyak@mail.ru

Численно изучена задача о неустойчивости Рихтмайера–Мешкова, возникающей под действием ударной волны, распространяющейся в атмосфере легкого газа и падающей на один, два или три вертикальных столба тяжелого газа или наногазовзвеси. Задача решается в рамках двухжидкостной гидродинамики. Сопоставление с известными данными показало, что используемый алгоритм

и качественно, и количественно правильно описывает течение. Изучено влияние на характер развивающейся неустойчивости числа Маха, соотношения плотностей газов в атмосфере и в столбах, расстояния между ними и их конфигурации.
Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 17-01-00040 и № 19-01-00399).

## ДИНАМИКА ДЕФОРМИРУЕМОЙ КАПЛИ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИЙ

**А.О. Иванцов[1,2], Т.П. Любимова [1,2]**

[1] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

aivantsov@icmm.ru, lyubimova@mail.ru

Исследовано поведение цилиндрической жидкой капли, в стратифицированной жидкости, заполняющей колеблющийся сосуд, в условиях невесомости. Рассмотрен случай, когда ось вибраций сонаправлена с градиентом плотности внешней жидкости. Моделирование проводилось в неосредненной постановке для сосуда квадратного сечения. В начальный момент капля находится в центре области. Обнаружено, что капля смещается в направлении более плотной жидкости. Получены зависимости средней силы, действующей на цилиндрическую каплю, от величины градиента плотности внешней жидкости и параметров вибраций. Изучены средние течения, генерируемые вблизи капли.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## ТЕЧЕНИЯ В КАПЛЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, ПОКОЯЩЕЙСЯ ИЛИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ВДОЛЬ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**В.В. Кирюшин**

*Российский технологический университет (МИРЭА), Москва*

kiryushin.valera@yandex.ru

Рассматриваются стационарные течения в капле жидкости, расположенной на плоской твердой поверхности или движущейся вдоль нее с постоянной скоростью. Течения индуцируются некоторыми гидродинамическими источниками, сосредоточенными на линиях контакта жидкость, воздух и твердое тело. Двумерная постановка задачи включает уравнение Стокса для несжимаемой жидкости, условие прилипания на твердой поверхности и обычные условия на поверхности раздела жидкость-воздух с учетом постоянного поверхностного натяжения. Для случая, когда интенсивность источников мала или поверхностное натяжение велико, найдено бесконечное множество точных решений задачи. Эти решения описывают систему вихрей в объеме капли.

## ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЖАТИИ (РАСШИРЕНИИ) СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ ИЗ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК: ОБОБЩЕНИЕ ЗАДАЧИ ЗАБАБАХИНА

**А.Б. Киселев**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, механико-математический факультет, Москва*

akis2006@yandex.ru

Получено точное решение одномерной динамической задачи о сжатии (расширении) сферического слоя из несжимаемой вязкой жидкости, движение которой в начальный момент времени отсутствует, а на внешней и внутренней его поверхностях действуют произвольным образом зависящие от времени давления. В случае, когда внешняя граница удаляется в бесконечность и давление там постоянно, а давление внутри полости (пузырька) отсутствует (задача Забабахина), показано, что при любом начальном радиусе пузырька его заполнение жидкостью всегда происходит за конечное время. Решения получены в лагранжевых переменных.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00151.

## ВИБРОКОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ КОНТЕЙНЕРЕ С УПРУГИМИ СТЕНКАМИ

**Н.В. Козлов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

kozlov.n@icmm.ru

Экспериментально изучается влияние вибрационной конвекции (осреднённых течений) на теплоперенос в жидкости в закрытых контейнерах. Контейнеры имеют упругую внешнюю стенку, которой сообщаются гармонические колебания, приводящие к возбуждению течений. Рассматриваются контейнеры цилиндрической формы. Методом трасерной визуализации изучаются структура и скорость течений. При постоянной мощности тепловыделения изучается скорость теплопереноса из объёма контейнера в окружающую термостатирующую жидкость в зависимости от интенсивности вибраций. Показана эффективность виброконвективного тепло-массопереноса для применения в технологиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-10189.

## ВИБРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В БЫСТРО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

**Н.В. Козлов[1], О.А. Власова [2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

kozlov.n@icmm.ru

[2]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

vlasova_o_a@mail.ru

Экспериментально изучается динамика системы двух несмешивающихся жидкостей в горизонтальном цилиндрическом контейнере. Жидкости имеют различную плотность и при достаточно быстром вращении равномерно распределяются вдоль оси цилиндра в виде столба и коаксиального слоя. Граница раздела вращающихся жидкостей неустойчива по отношению к центробежным волнам, которые в эксперименте возбуждаются полем тяжести при достаточно медленном вращении или вибрациями при совпадении с одной из собственных частот. Изучается структура осреднённых течений. Проводится теоретический анализ их скорости и порога устойчивости границы раздела. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10053.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ, РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОТОРЫХ УЧИТЫВАЕТ ПОРОГОВОЕ “ПОДКЛЮЧЕНИЕ” ФАКТОРА ПОПЕРЕЧНОЙ ВЯЗКОСТИ

**В.Н. Колодежнов**

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил*

*“Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, Воронеж*

kvn117@mail.ru

Рассмотрена реологическая модель несжимаемой жидкости, которая предполагает пороговый характер “подключения” фактора поперечной вязкости. С использованием этой модели проведено обоснование формирования поперечных составляющих скорости в малой окрестности той точки области течения, где модуль второго инварианта тензора скоростей деформаций превышает критическое значение. На основе предлагаемого подхода с привлечением эмпирических условий представлен анализ некоторых схем течения. Проведено сравнение с известными экспериментальными данными.

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУЕ ЖИДКОСТИ

**П.Н. Конон[1], А.Г. Макоед [1], В.Я. Шкадов [2]**

[1]*Белорусский государственный университет, Минск*

[2]*Московский государственный университет, Москва*

kononp@tut.by

Исследовано нелинейное развитие осесимметричных капиллярных волн, возникающих в струе жидкости при наличии переменного внешнего давления после потери устойчивости. Изучена форма поверхности струи и ее распад. Нелинейное взаимодействие начальных возмущений приводит к нарушению однородности капель, образующихся при распаде струи, а изменение внешнего давления способствует более интенсивному распаду струйного течения.

Работа выполнена при поддержке грантов БРФФИ (проект Ф18Р-225**) и** РФФИ (проекты 18-01-00762 и 18-51-00006).

## ИНТЕГРАЛЫ ДВИЖЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

**А.В. Коптев[1]**

[1]*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург*

Alex.Koptev@mail.ru

Рассматриваются интегралы 3D движения несжимаемой среды как известные, так и новые, полученные автором. Показано, что все они могут быть представлены посредством логической цепочки в виде дерева. В основании дерева расположен интеграл уравнений Навье – Стокса для общего случая 3D неустановившегося движения вязкой несжимаемой жидкости. Все остальные интегралы, включая и известные интегралы Бернулли, Эйлера – Бернулли, Лагранжа – Коши представляют его частные случаи.

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ И ПОТОКА ГАЗА В МИКРОКАНАЛЕ

**В.В. Кузнецов[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

qznetsov2013@yandex.ru

Изучение динамики и испарения тонких, увлекаемых потоком газа, пленок жидкости при локальном нагреве является в настоящее время одной из востребованных и сложнейших задач механики жидкости, поскольку прямым образом связано с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования. При этом испарение становится главным механизмом теплоотвода. Выполнен анализ деформаций и процесса испарения жидкой пленки, движущейся под действием потока сухого газа или потока пара жидкости в микроканале. Численно исследовано влияние на процессы теплообмена различных факторов.

## РЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СДВИГОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА РАССЛОЕНИЯ ПОТОКА

**Ю.Л. Кузнецова, О.И. Скульский**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

julyas@icmm.ru

Рассмотрены три вида реометрических сдвиговых течений полимерных жидкостей, проявляющих эффект расслоения сдвигового потока. Для описания этого эффекта используется модифицированная модель Виноградова-Покровского с немонотонной кривой течения. Для каждого из рассмотренных течений получены аналитические выражения для распределения профилей скорости и напряжения внутри зазора реометрической ячейки, построены зависимости относительно переменных измеряемых в соответствующих экспериментах. Полученные результаты позволяют говорить о качественном соответствии зависимостей, предсказываемых модифицированной моделью Виноградова-Покровского с немонотонной кривой течения, с экспериментальными данными.

## ИЗОЛИРОВАНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ЯЧЕЙКЕ, ПОДОГРЕВАЕМОЙ СБОКУ

**В.С. Кулешов[1], К.В. Моисеев[1,2]**

[1] *Институт механики УФИЦ РАН, Уфа*

[2] *Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

kuleshovvs@gmail.com

На основе проведения вычислительных экспериментов, показана возможность осуществления изолированных режимов конвекции жидкости в квадратной ячейке, подогреваемой сбоку. Система уравнений записана в приближении Обербека-Буссинеска. Для численного решения системы уравнений реализован метод контрольного объема и процедура SIMPLE.

Работа выполнена частично при поддержке гранта РФФИ № 17-41-020576 р_а и частично при финансировании государственного задания № 0246-2019-0052.

## ЯВЛЕНИЕ КАВИТАЦИИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ

**К.В. Леонов, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов, Сколковский институт науки и технологии, Москва*

Konstantin.Leonov@skoltech.ru

В настоящей работе разработана изотермическая модель кавитационного расширения газового пузыря в микромасштабном ограниченном объеме жидкости (конфайнменте). Проанализирован новый режим порога кавитации Блейка и получено модифицированное уравнение Рэлея-Плессета. Показано, что сжимаемость жидкости, также, как и давление газа в пузыре, вносят существенный вклад в частоту собственных колебаний пузыря. Результаты теоретического исследования согласуются с экспериментальными данными.

## МЕХАНИЗМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВОД ПРИ СЛИЯНИИ КРУПНЫХ РЕК

**Т.П. Любимова[1], А.П. Лепихин [2], Я.Н. Паршакова [1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Горный институт УрО РАН, Пермь*

lyubimovat@mail.ru

На основе трехмерного численного моделирования проверяется гипотеза о том, что причиной ослабления поперечного перемешивания при слиянии рек с близкими плотностями и химическими составами вод является формирование в них устойчивых вторичных поперечных вихревых структур. Расчеты подтвердили формирование поперечных вихревых структур и показали, что, хотя интенсивность поперечного течения гораздо ниже, чем интенсивность продольного течения, оно приводит к существенному ослаблению поперечного смешения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 19-41-590013) и Правительства Пермского края (Программа МИГ, грант № С-26/788, Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОЕМАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**Т.П. Любимова [1], А.П. Лепихин [2], Я.Н. Паршакова[1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Горный институт УрО РАН, Пермь*

parshakova@icmm.ru

Работа посвящена численному моделированию распространения тепловых загрязнений в водных объектах на примере Магнитогорского металлургического комбината. Данное предприятие отводит свои термальные сточные воды в Магнитогорское водохранилище на реки Урал. Полученные результаты показали формирование значительной температурной стратификации, наличие которой должно учитываться при конструировании технологических водозаборных сооружений. Для повышения устойчивости функционирования действующей системы водообеспечения предприятия в достаточно краткосрочные периоды наблюдения

экстремально высокой температуры воздуха предлагается организация селективного отбора воды из нижних наиболее холодных слоев воды в водоеме – охладителе.
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20093).

## ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЛИННОВОЛНОВОЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

**Т.П. Любимова, Е.С. Садилов**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
lyubimovat@mail.ru

Исследовано влияние горизонтальных вибраций на длинноволновую термокапиллярную неустойчивость двухслойной системы горизонтальных слоев несмешивающихся жидкостей с деформируемой границей раздела при вертикальном градиенте температуры в поле тяжести. Получено аналитическое выражение для критического числа Марангони в случае малых вязкостей, числа Галилея и амплитуды вибраций. Найдено, что вибрации оказывают дестабилизирующее действие. Численное исследование эволюции малых возмущений показало, что дестабилизирующее действие вибраций наблюдается и при конечных значениях параметров.
Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ, грант № С-26/788).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ ГИДРОПРОФИЛЕЙ

**Д.В. Маклаков[1], И.Р. Каюмов [2], С.Е. Газизова [3]**
[1,2,3]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*
dmaklak@kpfu.ru

Исследуется задача об обтекании суперкавитирующего гидропрофиля по схеме Гельмгольца–Кирхгофа с бесконечной каверной. С помощью формул для подъемной силы и сопротивления, выведенных в работе Maklakov D.V. (J.Fluid Mech, 2011, vol. 687, pp. 360-375), решена задача об определении формы гидропрофиля, который при заданном коэффициенте подъёмной силы имеет минимальный коэффициент сопротивления (максимальное качество). Выявлена роль носика профиля (локальной формы вблизи критической точки) для построения физически реализуемых течений. Показано, что даже носики весьма малых размеров порядка $10^{-4}$ – $10^{-3}$ длины хорды приводят к очень существенному уменьшению гидродинамического качества.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00115.

## МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ДЛИННОГО ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ ЧЕРЕЗ СТРАТИФИЦИРОВАННУЮ ВЯЗКУЮ ЖИДКОСТЬ

**П.В. Матюшин**
*Институт Автоматизации Проектирования РАН, Москва*
pmatyushin@mail.ru

При помощи математического моделирования исследовался механизм формирования пространственных гравитационных внутренних волн, реализуемый при прохождении длинного тела вращения в горизонтальном направлении вдоль оси симметрии тела справа налево в линейно стратифицированной по плотности несжимаемой вязкой жидкости. Сначала в верхнем полупространстве правее мест старта центров переднего П и тыльного Ф торцов тела формируются головные части вихревых петель. Далее периодически над П (пока П остается левее тыльного торца) и над Ф из-за сдвиговой и гравитационной неустойчивостей формируются и спускаются вниз вихревые кольца, левые половины которых трансформируются в полуволны.

## ДИФФУЗИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРАХ

**А.И. Мизев[1], Е.А. Мошева[1], В.А. Вяткин[2], Д.А. Брацун[2]**
[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
alex_mizev@icmm.ru

Возникновение конвективной неустойчивости в многокомпонентных жидких смесях с разной скоростью диффузии компонент исследуется экспериментально и теоретически. Представлены результаты исследований неустойчивости двойной диффузии для конфигураций слоистой многокомпонентной системы, ранее не рассматривовшихся в литературе. К такому случаю может быть отнесена, например, однонаправленная диффузия двух и более компонент раствора, изначально устойчиво стратифицированного в поле тяжести. Получены структуры движений жидкости и их эволюция во времени. Демонстрируется эффект возбуждения конвекции концентрационно-зависимой диффузии, ранее наблюдавшийся авторами только в задачах с химическими реакциями.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00621.

## КОНВЕКТИВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТ В МИКРОРЕАКТОРАХ ПРОТОЧНОГО ТИПА

**А.И. Мизёв, Е.А. Мошева, А.В. Шмыров**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

alex_mizev@icmm.ru

Исследована перспективность применения гидродинамической неустойчивости для смешивания реагентов в химических микрореакторах проточного типа. Показано, что, несмотря на малые характерные размеры задачи, возможно развитие конвективных течений гравитационного типа, обусловленных неустойчивостью Рэлея-Тейлора или двойной диффузии, а также за счет эффекта Марангони, обеспечивающих эффективное перемешивание изначально разделенной двухслойной системы движущихся жидкостей в зоне смешивания. Показано, что длина смешения может быть уменьшена на порядок по сравнению с перемешиванием диффузионными механизмами или за счет создания рельефа границ канала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-590100.

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ЧИСЛЕННОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗАМКНУТЫХ ОБЛАСТЯХ

**И.В. Мирошниченко, М.А. Шеремет**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

miroshnichenko@mail.tsu.ru

Проведено математическое моделирование турбулентных режимов сложного теплообмена (конвекция, теплопроводность, излучение) в замкнутой полости с твердыми теплопроводными стенками конечной толщины при наличии источника тепловыделения. Процесс переноса импульса, массы и энергии описывался системой дифференциальных уравнений в преобразованных переменных «функция тока –завихренность». Краевая задача решена методом конечных разностей на неравномерной сетке. Получены распределения как локальных (изолинии функции тока и температуры), так и интегральных (средние радиационное и конвективное числа Нуссельта) параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-79-20141.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛЕНКИ, СТЕКАЮЩЕЙ ПО ВОЛНИСТОЙ СТЕНКЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ

**Е.И. Могилевский, В.Я. Шкадов**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

mogilevskiy@mech.math.msu.su

Рассматривается задача о стекании тонкой пленки вязкой жидкости по наклонной плоскости с синусоидальным микрорельефом. Проводится анализ линейной устойчивости стационарного течения к периодическим по времени возмущениям. Применяются различные системы уравнений (Шкадов, Бенни, двупараметрическая модель для сильновязких жидкостей). Решение строится методом возмущений для малой амплитуды рельефа. Рельеф стабилизирует течение относительно возмущений из узкого диапазона частот. Найдено три типа эволюции картины неустойчивости, при этом более коротоковолновый рельеф соответствует наибольшей дестабилизации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-01-00762, 18-51-00006.

## ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЕСТЕСТВЕННУЮ КОНВЕКЦИЮ ЖИДКОСТИ

**К.В. Моисеев[1,2], В.С. Кулешов [1]**

[1]*Институт механики УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

constgo@mail.ru

В работе численно изучается влияние коэффициента теплопроводности жидкости зависящего от температуры на процесс естественной конвекции жидкости, в плоской ячейке подогреваемой снизу. Исследуются эпюры температуры и компонент вектора скорости жидкости, а также интегральные и локальные коэффициенты теплоотдачи в центральных сечениях и на границах ячейки. Рассмотрены линейная, экспоненциальная и нелинейная функции температуры для коэффициента теплопроводности.

Работа выполнена частично при поддержке гранта РФФИ № 17-41-020576 р_а и частично при финансировании государственного задания № 0246-2019-0052.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОГО ГЛАЙДЕРА

**Д.В. Никущенко, К.Д. Овчинников, В.А. Рыжов, Н.В. Тряскин**

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург*

nikushchenko@smtu.ru

В настоящей работе представлены результаты моделирования гидродинамических характеристик изолированного подводного модуля волнового глайдера с крыльевой системой, испытывающей вызванное периодическое вертикальное перемещение и свободное вращательное движение в безграничном потоке жидкости. Исследование пропульсивных характеристик колеблющихся крыльев

проводится методами вычислительной гидродинамики в открытом некоммерческом пакете OpenFOAM. Для моделирования движения вязкой несжимаемой жидкости используются уравнения Навье-Стокса и неразрывности осреднённые по Рейнольдсу. Результаты моделирования сравниваются с расчётными данными, полученными другими авторами, а также известными экспериментальными данными. По результатам моделирования предложены практические рекомендации по разработке конструкции подводного модуля волнового глайдера.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

**С.А. Очеретяный, И.И. Козлов, В.В. Прокофьев**

*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

prokof@imec.msu.ru

Изучаются кавитационные автоколебания, возникающие при течении жидкости в магистрали, содержащей кавитатор, каверну и сопло. Рассматривается возможность использования режима автоколебаний для создания на выходе пульсирующих струй. Показано, что могут реализовываться различные частотные моды автоколебаний, причем, для создания импульсных струй лучше всего подходит режим первой частотной моды. Прерывистое истечение жидкости из сопла реализуется при достаточно высоком среднем давлении в каверне, при этом максимальное давление в области соударения струй с препятствием значительно превосходит максимальное давление в каверне.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-01-00040.

## ВОЛНОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ, ВЫТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СОСУДА

**В.В. Орлов [1], А.Н. Темнов[2]**

[1]*ООО Интерпроком, Москва*

[2]*Московский Государственный Технический Университет им Н.Э.Баумана, Москва* antt45@mail.ru

В докладе рассмотрена задача о собственных движениях вращающейся жидкости, частично заполняющей осесимметричный сосуд при наличии истечения через жёсткое дно. Задача решена в квазистационарной постановке в рамках модели идеальной жидкости с учётом гидравлических потерь при протекании жидкости через дно сосуда. Численное исследование проведено с использованием метода конечных элементов. Исследован спектр собственных чисел и выявлены характеристики волновых движений жидкости, приведены результаты расчётов волновых чисел и комплексного коэффициента затухания.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ МГД ЭФФЕКТЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ ДИФФУЗИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**С.И. Перегудин [1], Э.С. Перегудина [2], С.Е. Холодова [3]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург*

[3]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

peregudinsi@yandex.ru.ru

В представленном исследовании изучается динамика крупномасштабных волновых процессов во вращающемся слое невязкой проводящей несжимаемой жидкости переменной глубины. Исследуемая задача моделируется как система уравнений в частных производных с учетом необходимых граничных условий.

С помощью введения вспомогательных функций исследуемая система магнитогидродинамических уравнений в частных производных редуцируется к одному скалярному уравнению в частных производных. Представлено точное аналитическое решение задачи о малых возмущениях. В результате получено, что, если внешнее магнитное поле параллельно оси вращения слоя, при конечных значениях магнитного числа Рейнольдса наблюдается процесс затухания магнитного поля.

## ТЕРМОВИБРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

**А.В. Перминов[1], М.Г. Казимарданов[2], Т.П. Любимова[2], Н.В. Давыдова[1]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

perminov1973@mail.ru

На основе осредненных уравнений термовибрационной конвекции изучено течение вязкопластической жидкости Уильямсона в замкнутой прямоугольной полости, вытянутой вдоль поля тяжести. Полость совершает продольные линейно-поляризованные вибрации. В полости задан поперечный градиент температуры. Получены структуры конвективных течений жидкости при различных интенсивностях нагрева и вибрационного воздействия. В потоке вязкопластической жидкости возникают квазитвердые зоны. С увеличением поперечного градиента температуры размеры квазитвердых зон уменьшаются, их форма меняется. Усиление интенсивности вибраций приводит к разрушению квазитвердых зон.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №14-21-00090).

## ТЕРМОВИБРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ ЖИДКОСТИ УИЛЬЯМСОНА В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ В НЕВЕСОМОСТИ

**А.В. Перминов[1], С.А. Никулина[1], Т.П. Любимова[2]**

*[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

*[2]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

perminov1973@mail.ru

Изучена термовибрационная конвекция вязкопластической жидкости в замкнутой полости, находящейся в невесомости и совершающей продольные линейно-поляризованные вибрации. В полости задан поперечный градиент температуры. При малых значениях вибрационного числа Грасгофа вязкопластическая жидкость находится в квазитвердом состоянии. С ростом вибрационного воздействия в полости возникает трехвихревое движение, которое трансформируется в пяти вихревое. С увеличением вибрационного воздействия квазитвердые зоны разрушаются, площадь жидких зон в осредненном потоке вязкопластической жидкости растет, а их форма сложным образом изменяется.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №14-21-00090).

## СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЖИДКОСТИ В ЖЕСТКОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ БАКЕ С УПРУГОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

**А.А. Пожалостин[1], Д.А. Гончаров [1]**

*[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

a.pozhalostin@mail.ru

В данной работе используется метод П.К. Ишкова – метод собственных функций уравнения Лапласа – для описания колебаний двухслойной жидкости в жестком баке с упругой перегородкой. Получено частотное уравнение системы в замкнутой форме. Обсуждается вопрос об экспериментальном определении декремента колебаний системы, используя подход Кулона.

## ЗАДАЧА СТОКСА ДЛЯ ЖИДКОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

**Т.П. Пухначева**

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск.*

tpuh@yandex.ru

Пусть жидкость заполняет пространство вне цилиндра, который совершает продольные гармонические колебания. Возникающая задача для жидкости второго порядка имеет периодическое по времени решение. Найдено поле скоростей и давлений в широком диапазоне определяющих параметров – числа Рейнольдса и параметра релаксации. В отличие от второй задачи Стокса для обычной вязкой жидкости (В.И. Букреев, 1988), где давление является постоянным, в жидкости второго порядка оно совершает колебания с удвоенной частотой. Этот эффект может быть использован для идентификации модели, которая находит применение при описании движения водных растворов полимеров.

## ОБ ОДНОМ ТОЧНОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА ДЛЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНО ПОКОЯЩЕЙСЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**А.С. Рабинович**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

arabinowitch17@gmail.com

Исследуется осесимметричное течение первоначально покоящейся несжимаемой вязкой жидкости, вызванное внешним давлением на оси симметрии. Соответствующее ему решение уравнений Навье-Стокса ищется в виде, в котором скорости и давление в жидкости выражаются через функции, зависящие от времени, квадрата радиальной координаты и осевой координаты. Показывается, что рассматриваемая задача допускает точное решение. В нем давление не зависит от осевой координаты, а компоненты скорости синусоидально зависят от осевой координаты и экспоненциально затухают на большом удалении от оси симметрии.

## ОБ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ВНУТРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ КОНЕЧНОГО РАДИУСА

**А.С. Рабинович**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

arabinowitch17@gmail.com

Уравнения Навье-Стокса рассматриваются в случае нестационарного осесимметричного течения несжимаемой вязкой жидкости внутри цилиндрической области конечного радиуса. Компоненты скорости жидкости в цилиндрической системе координат ищутся в виде степенных рядов по радиальной координате с коэффициентами, зависящими от времени и осевой координаты. Подстановка этих рядов в уравнения Навье-Стокса приводит к системе рекуррентных соотношений относительно данных коэффициентов. Исследуются случаи, при которых могут быть найдены явные формулы для их решений и получены аналитические выражения для компонентов скорости рассматриваемой вязкой жидкости.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПО НАКЛОННОЙ ПОДЛОЖКЕ НА ОСОВЕ УТОЧНЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

**Е.В. Резанова**

*Алтайский государственный университет, Барнаул*

katerezanova@mail.ru

Проведено численное моделирование процесса стекания тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости по наклонной подложке в условиях испарения на границе раздела под действием спутного потока газа. В качестве математической модели используются классические уравнения конвекции и обобщенные условия на границе раздела. Получено эволюционное уравнение для толщины жидкого слоя, построен алгоритм численного решения. Проведены численные исследования влияния различных эффектов на характер течения жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00291).

## ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**В.Я. Рудяк [1,2,3], А.А. Белкин[1]**

[1]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*

[2]*Новосибирский государственный университет*

[3]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

valery.rudyak@mail.ru

В работе методами неравновесной статистической механики построены замкнутые уравнения переноса флюида в стесненных условиях. Коэффициенты переноса, для которых получены определяющие соотношения, в этом случае становится свойствами всей системы «флюид–стенки». Они определяются не только взаимодействием молекул флюида между собой, но и их взаимодействиями с атомами стенок канала. Изменяя материал стенок, можно управлять коэффициентами переноса, делая их не только больше, чем в объеме, но и меньше. Полученные теоретические выводыпроиллюстрированы данными молекулярно-динамического моделирования. Изучена зависимость коэффициентов переноса от материала стенок и характерных размеров канала.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-01-00399-а).

## ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ НА ТЕПЛОВУЮ КОНВЕКЦИЮ В ПЛОСКОМ СЛОЕ ПРИ КРУГОВЫХ ВИБРАЦИЯХ

**К.Ю. Рысин, А.А. Вяткин, В.Г. Козлов**

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,*

*Лаборатория вибрационной гидромеханики, Пермь*

rysin@pspu.ru, vjatkin_aa@pspu.ru, kozlov@pspu.ru,

Исследуется тепловая конвекция и теплоперенос в горизонтальном плоском слое с изотермическими горизонтальными границами различной температуры. Рассматривается случай, когда слой совершает круговые вибрации в горизонтальной плоскости при одновременном вращении вокруг вертикальной оси. Частота и амплитуда вибраций, скорость вращения, толщина слоя, разность температур границ слоя и свойства жидкостей варьируются. Изучено влияние вращения на порог возникновения вибрационной тепловой конвекции и теплоперенос при круговых вибрациях полости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 18-71-10053).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНЫХ ВИБРАЦИЙ

**Р.Р. Сабиров[1], А.А. Вяткин [2]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[2]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

sabirov@pspu.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению влияния вибраций на конвекцию жидкости в быстро вращающемся цилиндрическом слое с границами разной температуры. Исследуются теплоперенос и структура конвективных течений, возбуждаемых поперечными вибрациями в случае более нагретой внутренней границы, когда центробежная сила инерции играет стабилизирующую роль. При частотах вибраций близких частоте вращения тепловой поток через слой значительно возрастает, что свидетельствует о нарушении устойчивого механического равновесия жидкости. Течения, вызывающие теплоперенос в полости, изучаются PIV-методом. Анализ результатов производится с позиций вибрационной гидродинамики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00779 мол_а.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ НАД КОМПАКТНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

**И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, М.О. Кучинский, М.М. Гончаров**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

ivan-sboev@yandex.ru

В ходе экспериментального исследования изучен механизм развития конвективного течения вблизи компактных источников тепла в форме круга, квадрата и треугольника. Согласно наблюдениям, характер развития конвективного течения определяется наличием в конфигурации локализованной области подогрева участков с наибольшим градиентом температуры. Результаты наблюдений находятся в хорошем согласии с данными, полученными в ходе численного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-31-00165 (изготовление моделей компактных источников тепла различной геометрической формы, калибровка LIF-метода визуализации) и в рамках гранта С-26/788 Правительства Пермского края.

## СОБСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ ОПЕРАТОРА ROT И ИНЕРЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦЕНТРИФУГИРОВАННОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**И.Н. Солдатов[1], Н.В. Клюева [1]**

[1]*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

igorsdtv@yandex.ru

Исследуются свойства собственных вектор-функций несамосопряженного оператора rot. Собственные функции оператора используются для построения решения в предложенной модели, описывающей волновые движения флотирующей вязкой несжимаемой жидкости, частично заполняющей полость быстровращающегося кругового цилиндра. Флотирующая жидкость – это жидкость с инерционной поверхностью, образуемой плавающими на свободной поверхности и не взаимодействующими между собой частицами, обладающими малой массой. Исследовано влияние вязкости и свойств поверхности на дисперсионные характеристики гироскопических волн во флотирующей жидкости, образующей центрифугированный слой на твердой стенке полости цилиндра. Определены условия устойчивости центрифугированного слоя к инфинитезимальным гармоническим возмущениям.

## ФОРМИРОВАНИЕ РЕЖИМА КАТЯЩИХСЯ ВОЛН В ТЕЧЕНИИ ХЕЛЕ-ШОУ

**И.В. Степанова[1], В.Ю. Ляпидевский [2], А.А. Чесноков [2]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

[2]*Институт гидродинамики им.М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

stepiv@icm.krasn.ru

Для двухслойного течения жидкости в ячейке Хеле-Шоу сформулированы условия существования квазиустойчивого режима в виде катящихся волн. Теоретический анализ подтвержден численным расчетом положения границы раздела двух жидкостей, малые возмущения которой при некоторых физических параметрах приводят к развитию неустойчивости. Построен двухпараметрический класс точных периодических разрывных решений, описывающих катящиеся волны. Получены карты устойчивости в фазовой плоскости “критическая глубина-амплитуда”.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00498.

## ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ

**С.В. Субботин**

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

subbotin_sv@pspu.ru

Экспериментально исследуются осредненные течения, возбуждаемые инерционными модами во вращающемся цилиндре. Для возбуждения инерционных мод скорость вращения полости модулируется с частотой, равной одной из собственных частот вращающейся жидкости. Колебания жидкости приводят к возникновению интенсивного осредненного течения вблизи боковой границы полости. Структура течения имеет вид системы тороидальных вихрей. Исследована зависимость интенсивности течений от номера возбуждаемой моды. Показано, что с увеличением числа Экмана инерционные моды диссипируют, что приводит к трансформации структуры осредненного течения.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ №МК-1994.2018.1.

## ВЛИЯНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С КОЛЕБЛЮЩИМСЯ ЯДРОМ

**С.В. Субботин, В.Г. Козлов, М.А. Ширяева**

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

subbotin_sv@pspu.ru

Экспериментально исследуются течения во вращающейся сферической полости, в центре которой находится колеблющееся сферическое ядро. Обнаружено, что колебания ядра генерируют осредненное течение, интенсивность которого пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. С увеличением скорости осредненного движения жидкости осесимметричное течение теряет устойчи-

вость, в результате чего в надкритической области наблюдается серия пороговых переходов. Показано, что наличие дифференциального вращения ядра модифицирует профиль азимутальной скорости жидкости, приводит к изменению порогов возникновения неустойчивостей.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-71-10053.

## О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ДВУМЕРНОМ КАНАЛЕ

**М.А. Сумбатян, В.В. Абрамов**
*Институт математики, механики и компьютерных наук ЮФУ, Ростов – на - Дону*
sumbat@math.rsu.ru

В работе рассматривается плоское однородное течение вязкой несжимаемой жидкости в канале постоянной ширины. Моделирование потока производится при помощи уравнения Навье-Стокса, записанного в терминах функция тока - вихрь. Для решения рассматриваемой задачи предлагается новый полуаналитический метод, сводящий уравнения Навье-Стокса к эллиптической задаче на каждом временном слое. Реализация данного метода основана на построении специальных функций Грина для функции тока и вихря. В статье приведен ряд графиков физических величин, определяющих процесс течения жидкости в канале постоянной ширины.
Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки (грант № 9.5794.2017/8.9).

## ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПЛЕНКИ СПИРТОСОДЕРЖАЩЕГО РАСТВОРА

**А.В.Татосов, К.А. Бородина**
*Тюменский государственный университет, Тюмень*
atatosov@utmn.ru

В работе исследуется поведение тонкой пленки спиртосодержащего раствора при ее нагреве. Изменение температуры свободной поверхности вместе с уходом летучей компоненты приводит к двум противоположным эффектам по направленности градиента поверхностного натяжения. Показано, что в рассматриваемой нестационарной задаче деформации пленки можно выделить четыре масштаба времени, связанных с развитием полей скорости, температуры и концентрации, а также с изменением высоты слоя. В зависимости от первоначальной толщины, деформация пленки может как опережать развитие поля концентрации, так и отставать от него. Получены формулы для полей основных величин и деформации пленки.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЧЕНИЯ АНОМАЛЬНО-ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КАНАЛАХ ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ СОЭКСТРУЗИИ

**Н.М. Труфанова[1], М.В. Козицына [1]**
[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
bachurinamaria@gmail.com

В настоящее время в кабельном производстве в качестве изоляционных материалов используются сшитые полиэтилены. Для создания многослойного изоляционного покрытия используют метод соэкструзии. В работе представлена математическая модель описывающая течение аномально-вязких жидкостей в каналах формующего инструмента реальной геометрии. Так как важным является определение максимальных температур, во избежание процессов предварительной сшивки была произведена оценка влияния технологических параметров.

## МОДЕЛИ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ НА ОСНОВЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

**С.В. Хабиров, С.С. Хабиров**
*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*
habirov@anrb.ru, salavat.s.khabirov@gmail.com

Выводятся различные приближенные модели раскрытия трещины в пористом пласте, основанные на априорных представлениях о размерах трещины, точных решениях уравнений движения вязкой жидкости, приближенных формулах модели фильтрации в пласте, приближенных формулах теории упругости пласта. С использованием закона сохранения массы жидкости в трещине получены квазилинейные параболические уравнения, описывающие раскрытие трещины.
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29- 10071 ).

## ТЕЧЕНИЕ МИКРОПОЛЯРНОЙ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПОРИСТЫМ ЯДРОМ

**Д.Ю. Ханукаева, А.Н. Филиппов**
*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва*
khanuk@yandex.ru

Поставлена и решена задача стационарного обтекания микрополярной жидкостью цилиндрической ячейки, состоящей из бесконечного пористого цилиндра, помещенного в соосную жидкую оболочку. Однородный поток направлен перпендикулярно оси ячейки. Решение сопряженной краевой задачи найдено в аналитическом виде. С помощью полученного решения исследовано влияние параметров задачи на гидродинамическую проницаемость волокнистой мембраны, моделируемой совокупностью упомянутых

цилиндрических ячеек в рамках ячеечного подхода. Отдельно рассмотрен важный предельный случай жидкой ячейки бесконечного радиуса в контексте парадокса Стокса.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00058.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ВНУТРЕННИЕ КОЛЬЦЕВЫЕ ВОЛНЫ НА СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ

**К.Р. Хуснутдинова[1], X. Zhang[1]**
[1]*Loughborough University, United Kingdom*
K.Khusnutdinova@lboro.ac.uk

Изучается распространение кольцевых волн в стратифицированной жидкости на параллельном сдвиговом течении в рамках полной системы уравнений Эйлера с граничными условиями применимы к моделированию океанских волн. Показано, что линеаризованная задача допускает разделение переменных, которое используется для изучения деформации волновых фронтов и для вывода амплитудных уравнений типа 2+1-мерного цилиндрического уравнения Кортевега – де Фриза. Рассматриваются примеры.

## ФОНТАНИРУЮЩЕЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ

**К.А. Чехонин**
*Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск*
lex7861@rambler.ru

Рассматриваетсяфонтанирующее течениевязкопластичной жидкости, реализуемое при заполнении области между вертикальными коаксиальными цилиндрами. В основу математического описания процесса положены уравнения движения с реологической моделью Шульмана, неразрывности и естественные граничные условия на свободной поверхности. Особенностью решения является сингулярность напряжений на линиях трехфазного контакта. Численный решения задачи основано на методе конечных элементов с использованием ALM алгоритма. Проведены параметрические исследования влияния основных параметров задачи на кинематику движения жидкости со свободной поверхностью.

## АВТОКОЛЕБАНИЯ В ГИДРОСИСТЕМАХ С ОГРАНИЧЕННОЙ ИСКУССТВЕННОЙ ГАЗОВОЙ КАВЕРНОЙ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

**П.М. Шкапов [1]**
[1]*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*
spm@bmstu.ru

В работе представлены результаты исследования динамики течения жидкости в трубопроводе с искусственной газовой каверной, возникающей в результате вдува газа в поток жидкости и ограниченной в своем осевом развитии расположенным на выходе трубопровода местным гидросопротивлением типа дроссельной шайбы. Разработана математическая модель, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, предложены варианты использования в технических устройствах и технологических процессах.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЕНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

**Н.Д. Шмакова[1], Н.А. Пеньковская [1], А. Пуисто[2], Е.В. Ерманюк[1], С. Сантуччи[1,3]**
[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*
[2]*Aalto University, Хельсинки*
[3]*École normale supérieure de Lyon, Лион*
shmakova@hydro.nsc.ru

Представлено экспериментальное исследование течения жидкой пены, состоящей из монослоя миллиметровых пузырьков с постоянной скоростью потока, при наличии проницаемого препятствия. Для моделирования простейшей гетерогенной среды используется ячейка Хеле-Шоу. Одиночный дефект локализован в середине ячейки, уменьшая ее локальную проницаемость. Исследуется влияние геометрических свойств дефекта (высота, ширина, форма) на средний устойчивый поток пены. С точки зрения течения пены, мы можем наблюдать четкую рециркуляцию вокруг препятствия, характеризованную квадророльным полем скоростей с отрицательной волной на препятствии, интенсивность которых развивается систематически с высотой препятствия.
Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 14.W03.31.0002.

## КОНВЕКТИВНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЭЛЕЯ В ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ: КРУГОВОЕ ОБЛАЧНОЕ ПЯТНО

**Б.Я. Шмерлин**
*НПО "Тайфун", Обнинск*
shmerlin@rpatyphoon.ru

Предложена теория конвективной неустойчивости слоя атмосферы, содержащего круговое облачное пятно. Ранее теория была развита для пятна в форме облачной полосы (Б.Я. Шмерлин и др., ЖЭТФ, 2017, т. 152). Найдены решения, представляющие конвективные вихри с восходящими либо нисходящими движениями на оси, а также облачные кластеры с кольцевыми конвективными

структурами. Масштаб вихрей может меняться от масштаба смерча до масштаба урагана. Решения с нисходящими движениями на оси могут соответствовать формированию “воронки” смерчей или “глаза бури” ураганов.
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00300.

## ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СЛОЕ ПАВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА

**А.В. Шмыров[1], А.И. Мизёв [1], Д.А. Брацун[2], В.И. Дёмин[3], М. Петухов[3]**
[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[3]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
Shmyrov@icmm.ru

Выполнено комплексное исследование задачи о движении жидкости в прямоугольной полости со свободной неоднородно нагретой верхней границей, покрытой слоем ПАВ. Акцент сделан на нелинейном виде уравнения состояния слоя ПАВ. Экспериментально обнаружено образование двух зон на свободной поверхности: подвижной и застойной, а также возникновение фазового перехода в слое ПАВ. Выполнено обобщение существующей теории на случай двухфазного уравнения состояния. В численном моделировании воспроизведены наблюдаемые в эксперименте структуры течений и профили температуры на свободной поверхности.
Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/174.2

## РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ-ПЕТЕЛЬ

**Г.А. Щеглов[1], И.К. Марчевский[1], С.А. Дергачев[2]**
[1]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*
[2]*АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, М.О.*
shcheglov_ga@bmstu.ru

Разработана новая модификация бессеточного вихревого лагранжева метода, основанного на представлении завихренности в области течения в форме замкнутых вихревых петель. Для удовлетворения граничных условий на теле применяется усовершенствованная численная схема, основанная на обеспечении равенства нулю касательной компоненты скорости на поверхности тела. Новый алгоритм генерации петель, основанный на гипотезе потока завихренности, позволяет моделировать зоны отрыва за счет самоорганизации петель. Показано, что такой подход имеет ряд преимуществ для расчета гидродинамического нагружения тел при их пространственном обтекании.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01468 А.

## О СКРЫТОМ ИНТЕГРАЛЕ СОХРАНЕНИЯ В ТЕОРИИ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

**Н.И. Яворский [1,2]**
[1]*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*
yavorsky@sesc.nsu.ru

В работе исследуется физическая природа скрытого интеграла сохранения для неавтомодельных затопленных струй вязкой несжимаемой жидкости. Показано, что скрытый интеграл возникает, если положение источника импульса струи не совпадает с местом истечения струи. В этом случае в струе возникает поток момента количества движения. Если вектор расстояния между источниками параллелен вектору полного потока импульса, то поток момента количества движения равен нулю, но имеется вклад в поле скорости и давления пропорциональный длине этого вектора, который определяет скрытый интеграл сохранения.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-20036 и проекта ИТ СО РАН №АААА-17-117020900052-7.

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

**В.В. Булатов [1], Ю.В. Владимиров [2]**
[1]*Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*
[2] *Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*
internalwave@mail.ru

Рассмотрена задача о моделировании полей внутренних и поверхностных гравитационных волн вдали от движущегося нестационарного источника возмущений. Получены интегральные формы решения и показано, что волновая картина возбуждаемых волновых полей представляет собой систему гибридных волновых возмущений, обладающих свойствами волн двух типов: кольцевидных и клиновидных. Представлены результаты численных расчетов, описывающие особенности фазовых структур и волновых картин возбуждаемых полей. Проведено сравнение аналитических результатов с данными натурных измерений.
Работа выполнена по теме государственного задания АААА-А17-117021310375-7.

## Подсекция II-2. АЭРОДИНАМИКА И ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛАТТЕРА КОНСТРУКЦИЙ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

**Ф.А. Абдухакимов**

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

farruh.abduhakimov7@gmail.com

В настоящей работе с помощью энергетического метода исследуется одномодовый флаттер панелей обшивки, имеющих форму прямоугольника, трапеции и параллелограмма и влияние конструктивных параметров на границы флаттера лопаток. Показано, что для панелей в форме параллелограмма даже при небольшом угле скоса увеличивается их аэроупругая устойчивость при малых сверхзвуковых скоростях. В противоположность этому, границы флаттера для трапециевидных панелей изменяются незначительно по сравнению с прямоугольными панелями. Изучение флаттера лопаток показало, что влияние значения монтажного натяга существенно в отличие от других рассмотренных параметров.

### ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ

**А.А. Аксенов[1], С.В. Гувернюк[2], М.М. Симоненко[2], А.С. Шишаева [1,2]**

[1]*ООО «Тесис», Москва*

[2]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

anastasiashishaeva@rambler.ru

Представлены результаты численного моделирования управления потоком с помощью искусственного источника возмущений (струйного или теплового) при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с кольцевой каверной на режиме гистерезиса. Моделирование выполнено с использованием программного комплекса FlowVision. Исследовано влияние местоположения, мощности и длительности действия источника на перестройку результирующего течения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ по проекту № 19-01-00242.

### ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ДЕТОНАЦИОННЫМ И ДЕФЛАСРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ. ОСОБАЯ РОЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ДЕТОНАЦИОННЫХ КАМЕРАХ

**В.Г. Александров [1], А.Д. Егорян[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

adegoryan@ciam.ru

Выполнено сравнение прямоточных воздушно-реактивных двигателей разных схем с медленным и детонационным горением. В основе проведенного сравнения – простейшие модели термодинамики, детонационной волны, торможения воздуха, расширения продуктов сгорания в идеально регулируемых соплах. В рамках таких моделей при фиксированном показателе адиабаты характеристики каждого двигателя зависят от двух параметров – числа Маха (полёта) и безразмерной теплотворной способности горючей смеси. Сравнение, проведенное для реальных величин этих параметров с анализом термодинамических циклов и одномерными нестационарными расчётами, подтвердило важность учёта нестационарных процессов в камерах сгорания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20059 и № 17-01-00126.

### ЭВОЛЮЦИЯ ОБЛАСТИ ВОЗВРАТНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ТЕЛ СО СВЕРХЗВУКОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

**А.Л. Афендиков, А.Е. Луцкий, И.С. Меньшов, В.С. Никитин, Я.В. Ханхасаева**

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

allutsky@yandex.ru

Рассмотрены особенности течения, образующегося при вылете тела малых размеров навстречу потоку из сферически затупленного цилиндра со сверхзвуковой скоростью. Диаметр цилиндра в 35 раз превышает диаметр выстреливаемого тела. Расчет обтекания движущихся тел выполнен с использованием метода свободной границы и многоуровневых декартовых сеток с локальной адаптацией на основе вейвлет-анализа. Исследована динамика взаимодействия движущегося тела с головной ударной волной, формирования области возвратного течения между телами, ее деформация и исчезновение, и последующее установление стационарного течения. Получено снижение сопротивления главного тела до уровня 20% от изначального.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-30014.

### АНАЛИЗ RANS/ILES-МЕТОДОМ ВЛИЯНИЯ БОКОВОГО ВЕТРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ДОЗВУКОВОМ ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ САМОЛЁТА

**Р.Ш. Аюпов[1], Л.А. Бендерский[1], Д.А. Любимов[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения, Москва*

rsaupov@ciam.ru

С помощью комбинированного RANS/ILES-метода высокого разрешения исследовано влияние бокового ветра на течение в модели воздухозаборника, характерного для современных ТРДД. Скорость ветра варьировалась в диапазоне от 0 до 15 м/спри фиксиро-

ванном давлении на выходе воздухозаборника, при котором обеспечивается расход воздуха, соответствующий условиям взлёта. Получены зависимости параметров неоднородности потока и параметров турбулентности на выходе из воздухозаборника от скорости бокового ветра.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-08-00271.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВОГО СЛЕДА ВБЛИЗИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Н.А. Баранов [1], А.Н. Корочков [2], А.В. Родыгин[3]**

[1]*ВЦ РАН ФИЦ ИУ РАН, Москва*

[2]*Московский авиационный институт, Москва*

[3]*АО «Бортовые аэронавигационные системы», Москва*

korochkov@ians.aero

Рассмотрены особенности формирования вихревого следа за самолетом, при его полете на малой высоте над подстилающей поверхностью разного типа. Анализ проведен на основе данных численного моделирования. Для сравнения были рассмотрены земная и морская поверхности. При моделировании учитывалось изменении геометрии водной поверхности под воздействием воздушного потока. Показаны качественные отличия в структуре вихревого следа и интенсивности его взаимодействия с пограничным слоем подстилающей поверхности.

## ИССЛЕДОВАНИЕ В ОБЕСПЕЧЕНИИ СОЗДАНИЯ МНОГОРЕЖИМНЫХ СОПЕЛ СВЕРХЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

**Н.И. Батура, А.В. Руденко , А.Г. Ереза**

*ФГУП "ЦАГИ" им.профессора Н.Е.Жуковсокго, Жуковский*

nikolay.batura@tsagi.ru

Изложена методика и результаты расчета плоских сверхзвуковых контуров регулируемых сопел, обеспечивающих в диапазоне чисел M=1,0-4,0 поля течений с допустимой величиной неравномерности ΔM/M в первом характеристическом ромбе при минимальном количестве силовых факторов, обуславливающих характер упругого выравнивающего участка. Методика основана на численном расчете течения газа в сопле с представлением контура гибкого участка в виде кубического сплайна. Приводится сравнения результатов полученных методом характеристик и численного расчета проведенного в пакете программ ANSYSCFX.

## ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ

**С.П. Баутин[1], И.Ю. Крутова [1], А.Г. Обухов [2]**

[1]*Снежинский физико-технический институт, Снежинск*

[2]*Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

SBautin@usurt.ru

Данная теория основана на предложенной С. П. Баутиным схеме возникновения и устойчивого функционирования природных восходящих закрученных потоков: торнадо, тропические циклоны. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований этих потоков. Впервые даны обоснованные ответы на вопросы: «Почему возникает закрутка в этих потоках и откуда берется энергия для вращательного движения воздуха в них?». Высказаны рекомендации по использованию полученных результатов: раннее обнаружение и уничтожение торнадо и тропических циклонов, создание вихревого энергогенератора, работающего за счет кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ, ЗАДАННОЙ ПОЛНОЙ СИСТЕМОЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

**С.П. Баутин[1], С.Н. Кононов [1,2], Э.С. Левунина[1,3]**

[1]*Снежинский физико-технический институт, Снежинск*

[2]*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

[3]*Производственное объединение «Маяк», Озёрск*

SBautin@usurt.ru

В работе предлагается вариант решения численным методом одной газодинамической задачи, поставленной в монографии [1]. Предложенная полная система уравнений Навье-Стокса в цилиндрических координатах при использовании центральных конечных разностей представлена явной разностной схемой. Предложена программная реализация счёта для известного точного решения системы. Поставлена задача распараллеливания действий для обработки модели на кластерных системах, что необходимое решение для уменьшения времени счёта.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ

**В.Г. Белова [1,2], Д.В. Комратов[1,2], В.А. Степанов[2]**

[1]*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

[2]*ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва*

vgbelova@ciam.ru

Разработана экспериментальная модель блока генератора сверхкритических синтетических струй, на основе искрового разряда.Представлены результаты параметрических экспериментальных исследований модели блока генератора. Получены эффективные режимы работы генератора с точки зрения потребляемой мощности и скорости выдуваемой струи. На основе экспериментальных исследований проведены расчетные исследования газодинамический закономерностей образования и распространения сверхкритических синтетических струй с помощью RANS и URANS методов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00271.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ RANS/ILES МЕТОДОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЯМИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ВОЗДУХОЗАБОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

**Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов, Н.А. Польняков**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

lyubimov@ciam.ru

С помощью эффективного RANS/ILES метода исследовано воздействие синтетических струй на течение в воздухозаборном устройстве, интегрированным с планером сверхзвукового делового самолета, при разном дросселировании. Проанализировано влияние режимных параметров струй на течение в воздухозаборнике. Получено, что струи уменьшают отрывные зоны, возникающие при взаимодействии скачков с пограничным слоем, снижают уровень окружной неравномерности полного давления. На дроссельных режимах они уменьшают уровень пульсаций давления на выходе из воздухозаборника, зеркальным образом меняют асимметрию отрывных зон, либо устраняют ее.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00271.

## АНАЛИЗ RANS/ILES МЕТОДОМ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КАНАЛАХ

**Л.А. Бендерский [1], Д.А. Любимов [1], А.Ю. Макаров[1], А.А. Терехова[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения, Москва*

alexa.terekhova@yandex.ru

С помощью RANS/ILES метода высокого разрешения исследованы сложные турбулентные течения в каналах тракта ТРД. В работе продемонстрированавозможность использованиясинтетических струй разного типа для эффективного управления течениями в аэродинамических каналах. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00271.

## ОДНОМОДОВЫЙ ФЛАТТЕР УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА ПРИНАЛИЧИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

**В.О. Бондарев**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

bondarev.vsevolod@yandex.ru

Исследуется флаттер упругой пластины в сверхзвуковом потоке вязкого газа. Изучено влияние вязких возмущений пограничного слоя на одномодовый флаттер пластины. Показано, что в случае обощенно-выпуклого слоя при толстых пограничных слоях, пластина полностью стабилизируется. В случае профиля с точкой перегиба, утолщение слоя сначала приводит к увеличению скорости роста возмущений. Проведено численное моделирование плоских сверхзвуковых течений газа с пограничными слоями, которые могут оказывать дестабилизирующее влияние на флаттер упругой поверхности, над разными криволинейными поверхностями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-00407.

## ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ КРЫЛА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА С МОТОГОНДОЛОЙ ДВИГАТЕЛЯ РАСПОЛОЖЕННОЙ У ЗАДНЕЙ КРОМКИ КРЫЛА

**Н.Н. Брагин[1], А.Л. Болсуновский[1], Н.П. Бузоверя[1], С.И. Скоморохов[1], В.В. Янин [1]**

[1]ФГУП «Центральный Аэрогидродинамический институт им. Проф. Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), г. Жуковский

skomorohov@tsagi.ru

Выполнены численные исследования особенностей обтекания крыла пассажирского самолета с двигателем расположенным у задней кромки на верхней поверхности. Проведены параметрические исследования с целью минимизации сопротивления компоновки крыло+фюзеляж+гондолаПриведен сравнительный анализ обтекания и величин индуктивного, волнового и профильного сопротивлений рассмотренных компоновок. Разработаны мероприятия по уменьшению вредной аэродинамической интерференции между

крылом и гондолой ТРДД. Подтверждена возможность обеспечения высокого уровня сопротивления интерференции и предельно допустимого значения величины Судоп.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПВРДТТ С УЧЕТОМ ВЫГОРАНИЯ ЗАРЯДА

**А.И. Брызгалов[1], С.Е. Якуш[1], С.А. Рашковский[1]**

[1]*Институт проблем механики РАНим. А.Ю. Ишлинского, Москва*

bryzgalov@ipmnet.ru

В работе рассчитаны основные газо- и термодинамические характеристики сверхзвукового двумерного течения в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Модель учитывает выгорание поверхности заряда твердого топлива с течением времени и позволяет рассчитать связанные с этим изменения параметров работы двигателя.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-01084.

## АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА

**П.А. Вельмисов[1], А.Н. Богданов[2], Ю.А. Тамарова[3]**

[1,3]*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск*

[2]*Институт механики МГУ, Москва*

velmisov@ulstu.ru

Предложено разложение для потенциала скорости, на основе которого получено асимптотическое нелинейное уравнение, описывающее трансзвуковые течения газа. Это уравнение является обобщением классических уравнений для околозвуковых течений в случае учета дополнительного поперечного обтекания.Получены некоторые частные решениякак для классических уравнений, так и для полученного обобщенного трансзвукового уравнения, учитывающего поперечные возмущения. На их основе построены решения ряда задач трансзвуковой аэродинамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Ульяновской области (проект №18-41-730015).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭРОТЕРМОДИНАМИКИ ПРИ ТЕЧЕНИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В СЛЕДЕ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

**Ю.А. Виноградов[1], А.И. Леонтьев[1,2], С.С. Попович[1], М.М. Стронгин[1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва*

pss@imec.msu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования параметроваэротермодинамики при течениисверхзвуковогопотока в следе за обратным уступом. Исследование проводилось на нестационарном режиме в процессе выхода аэродинамической установки на равновесный тепловой режим. Число Маха набегающего потока составило 2.2, критерий Рейнольдса по длине динамического пограничного слоя – не менее $2 \cdot 10^7$ на срезе сопла.Высота уступа варьировалась от 8 до 16 мм,толщина невозмущенного пограничного слоя – около 6 мм.Представлен график распределениякоэффициента восстановления температуры по длине модели за уступом.

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00234).

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ТРАКТА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В НОСОВОЙ ЧАСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**В.А. Виноградов, Д.И. Кусюкбаева, В.А. Степанов**

*ЦИАМ им.П.И.Баранова, Москва*

*dikusyukbaeva@ciam.ru*

Приведены результаты численного исследования газодинамического тракта силовой установки, размещаемой в носовой части летательного аппарата. Рассмотрены четыре варианта воздухозаборника с различными диаметрами входа и получены значения коэффициентов расхода и полного давления. Сделаны оценки сопротивления воздухозаборника, тракта силовой установки и всего корпуса аппарата с учетом его донного сопротивления. Для оценки тяговых характеристик силовой установки моделировался тепломассоподвод в камере сгорания при нескольких значениях коэффициента избытка воздуха и постоянном коэффициенте полноты сгорания.

## РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА МОДЕЛИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА – «ГЛАЙДЕРА» HEXAFLY-INT

**Н.В. Воеводенко[1], А.А. Губанов[1], Д.С. Иванюшкин[1], Ю.Г. Швалев[1], Й. Стилант[2]**

[1]*ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский*

[2]*ESA-ESTEC, Нидерланды*

nina.voevodenko@tsagi.ru

Исследован ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) на поверхности экспериментального летательного аппарата (ЛА) без двигателя – «глайдера» HEXAFLY-INT на различных режимах, соответствующих точкам предполагаемой траектории полёта.Целью

данных исследований являлась оценка влияния ЛТП на суммарные аэродинамические характеристики ЛА. Для исследования ЛТП был применён комплексный подход с использованием различных методов: 1) численного моделирования ЛТП с помощью CFD-методов; 2) с помощью эмпирических формул и критериев; 3) эксперимента в АДТ ЦАГИ Т-116. Работа выполнена в рамках международного проекта HEXAFLY-INT.

## ФОКУСИРОВКА И КУМУЛЯЦИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН И ДВИЖУЩИХСЯ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ ТЕЛ С ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ

**П.Ю. Георгиевский [1], В.А. Левин [1], О.Г. Сутырин [1]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

georgi@imec.msu.ru

Проведено сравнительное численное исследование взаимодействия распространяющихся в газах ударных волни обтекаемых сверхзвуковым потоком затупленных тел с газовыми пузырями эллипсоидальной формы пониженной и повышенной плотности. Показано, что причиной возникновения аномальныхвсплесков давления в критической точке тел является предшествующая фокусировка поперечных ударных волн в малом объеме на оси симметрии течения, сопровождающаяся в отдельных случаях формированием тонких кумулятивных струй.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-01092, 18-01-00793).

## НОВЫЕ РЕЖИМЫОТРИЦАТЕЛЬНОГО МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ ПРИ ДИФРАКЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА КЛИНЕ

**П.Ю. Георгиевский[1], А.Н. Максимов[1,2]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Механико математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

andmax@imec.msu.ru

Численно исследованы газодинамические течения при «отрицательном» маховском отражении в задаче о дифракции ударной волны на клине, которые реализуются в газах со сложной молекулярной структурой (с показателем адиабаты, близким к единице). Наряду с известными режимами двойного и тройного маховского отражения обнаружены качественно новые автомодельные режимы с четырьмя или пятьюмаховскими конфигурациями.Исследованы условия реализации режимов многократного отражения при изменении угла клина, показателя адиабаты газа и числа Маха ударной волны.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-01-00793).

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ПОЛЕТ ТЕЛА С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ В ГАЗЕПРИ НАЛИЧИИ РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛА

**С.И. Герасимов[1,2,3], В.А. Кикеев[2,3], В.А. Кузьмин [1,2], А.П. Фомкин [1]**

[1]*Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров*

[2]*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

[3]*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород*

vkikeev@mail.ru

Проведено экспериментальное исследование с целью оценки возможности и методической отработки проведения аэробаллистических испытаний для исследования процессов гиперзвукового обтекания тел.Приведены описание условий экспериментов, схемы их проведения и состав использованной регистрирующей аппаратуры. В качестве объектов испытаний использовались металлические шары, выполненные из различныхконструкционных материалов. Для данных изделий показан характер обтекания, проведено численное моделирование, получены зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Маха.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2078.2019.8.

## КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯВ ДИФФУЗОРЕ

**И.А. Давлетшин[1,2], Н.И. Михеев[1]**

[1]*Институт энергетики иперспективных технологий ФИЦКазНЦ РАН, Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Казань*

davlet60@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования структуры потока воздуха в плоском диффузоре при пульсационном изменении его расхода. Измерения полей скорости проводились оптическим методом на основе цифровой видеосъемки с применением дымовой визуализации картины течения. Построены профили скоростей в различных фазах пульсаций потока. Выявлены основные особенности структуры пульсирующего течения в диффузоре. Предложен физический механизм формирования картины течения, связанный с образованием вихревых структур на определенных режимах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00889.

## ПОСТРОЕНИЕ В АВТОМОДЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОСЛЕ РАСПАДА СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА

**С.Л. Дерябин[1], А.С. Кирьянова[1]**

[1]*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

SDeryabin@usurt.ru

Рассматриваются двумерные изэнтропические течения политропного газа, возникающие после мгновенного разрушения непроницаемой стенки в начальный момент времени, отделяющей неоднородный покоящийся газ от вакуума. В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики с учетом силы тяжести. В системе уравнений газовой динамики вводятся нестационарные автомодельные переменные. Для полученной системы ставится задача Коши с данными на звуковой характеристике. Из необходимых условий разрешимости находятся начальные условия. Решение начально-краевой задачи строится в виде степенных рядов. Коэффициенты рядов находятся при интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнений.

## СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИКИ

**А.В. Дмитренко [1,2]**

[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия*

[2]*Российский университет транспорта «МИИТ», Россия*

AVDmitrenko@mephi.ru; ammsv@yandex.ru

На основе разработанной теории эквивалентных мер и теории множеств с повторяющимися элементами излагаются основные положения стохастических уравнений для неизотермичной жидкости. Представляемый физико–математический аппарат, определяет стохастический сценарий процесса зарождения и развития турбулентности, и позволяет с единых физико-математических позиций получать аналитические решения для характеристик турбулентных потоков.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИКИ

**А.В. Дмитренко[1,2], М.А. Колосова [1]**

[1]*Российский университет транспорта «МИИТ», Россия*

[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия*

Рассматривается практическое применение результатов стохастической теории гидродинамики в рамках проводимой модернизации системы водо- и теплоснабжения промышленных объектов, в рамках основных ориентиров энергетической стратегии Российской Федерации. Для условий проводимой модернизации оборудования в статье представлены основные достигаемые технические показатели. Рассчитываются гидравлические показатели, полученные на основе решений стохастической системы уравнений.

## ОБ ОСОБЕНОСТЯХ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ПЛАСТИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ВЯЗКИМ ГАЗОМ

**Г.Н. Дудин, В.Я. Нейланд**

*Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский*

gndudin@yandex.ru

Исследовано течение в пограничном слое на скользящей пластине конечной длины на режиме сильного взаимодействия с гиперзвуковым потоком. В окрестности передней кромки проведены разложения функций течения в ряды в предположении, что на задней кромке задается давление, величина которого зависит от поперечной координаты. Установлено, что в полученные разложения входит неопределенная функция и ее производная по поперечной координате. Сформулированы и численно решены соответствующие краевые задачи, найдены собственные числа и показано, что показатель степени в третьем члене разложения отличается от второго только на единицу.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00211

## ВЛИЯНИЕ ВЫДУВА ГАЗА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА КОСМИЧЕСКИХ КАПСУЛАХ

**И.В. Егоров[1,2], А.О. Образ[1,2], Н.В. Пальчековская[1,2], А.В. Федоров[1]**

[1]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

nathalie.palchekovskaya@gmail.com

Представлены результаты численного исследования влияния нормального выдува газа на устойчивость пограничного слоя при обтекании модели космического аппарата. Численное моделирование основано на решении уравнений Навье-Стокса в осесимметричной постановке. Задача устойчивости пограничного слоя исследуется в рамках линейной теории устойчивости и $e^N$ метода. Получена корреляция расчетных значений положения точки потери устойчивости пограничного слоя с экспериментальным положением начала ламинарно-турбулентного перехода.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-79-10438 (подготовка геометрии и настройка расчетных программ) и гранта РФФИ №17-08-00969 (численное моделирование и анализ результатов).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСТРЕЧНОГО ВЫДУВА ГАЗА ЧЕРЕЗ НЕСИММЕТРИЧНУЮ ЩЕЛЬ В ПЕРЕДНЕЙ КРОМКЕ ОСТРОГО КЛИНА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОТОК

**И.В. Ежов[1,2], Э.Б. Василевский[1], А.В. Новиков[1,2], П.В. Чувахов[1,2]**

[1]*ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный*

van81@inbox.ru

Выполнено экспериментальное исследование структуры потока, обтекающего острый клин, и теплообмена потока на боковых поверхностях острого клина с углом полураствора 20º при встречном выдуве газа (воздуха) через несимметричную щель, смещенную на 0.1 мм от плоскости симметрии. Параметры течения: $M_\infty = 6$, $T_0 = 500$º C.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01385.

## СТРУКТУРА ПОТОКА И ТЕПЛООБМЕН В ОБЛАСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ, СФОРМИРОВАННОГО УГЛОМ СЖАТИЯ

**В.И. Запрягаев, И.Н. Кавун**

*ФГБУН Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск*

zapr@itam.nsc.ru

Представлены результаты исследования ударно-волновой структуры течения и особенностей течения в области присоединения сверхзвукового ламинарного отрывного течения. Число Маха набегающего потока M = 6. Угол наклона уступа изменялся в диапазоне φ = 20° – 50°. Показано, что вниз по потоку за линией присоединения существует тонкий высоконапорный слой, в котором полное давление значительно выше, чем в окружающем его потоке. Представлены данные о характеристиках теплового потока. Проведено сопоставление результатов измерения с опубликованными данными.

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОМ СЛОЕ ОКОЛО РОМБОВИДНОГО КРЫЛА С КОНИЧЕСКИМ СОПРЯЖЕНИЕМ КОНСОЛЕЙ И КРИТЕРИИ ИХ СУЩЕСТВОВАНИЯ

**М.А. Зубин, Ф.А. Максимов, Н.А. Остапенко**

*НИИ механики МГУ, Москва*

ostap@imec.msu.ru

Представлены результаты численного исследования управления структурой течения около ромбовидного крыла при обтекании со скольжением на режимах со сверхзвуковыми передними кромками.Параметром управления выбран полуугол кругового конуса, вписанного в двугранный угол между плоскими консолями крыла. Показана эффективность такого управления для ликвидации вихревых структур на подветренной консоли крыла. Определены критерии существования вихревых особенностей Ферри в отсутствие точек ветвления ударных волн.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00182).

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ НА ДИФФУЗОРНЫЙ ОТРЫВ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КРЫЛА

**О.М. Карякин, А.Г. Наливайко, М.В. Устинов, Я.Ш. Флаксман**

*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*

karyakin@progtech.ru

Проведены экспериментальные исследования воздействия актуатора синтетических струй для устранения отрыва потока на прямом крыле с профилем NACA 0012. Показано, что прималых числах Рейнольдса ($Re=(0.3–0.5)\cdot10^6$), когда актуатор находится внутри отрывной зоны, воздействие синтетических струй значительно уменьшает ее размеры и смещает точку отрыва вниз по потоку. При этом увеличивается коэффициент подъемной силы крыла более 10%. При больших числах Рейнольдса $Re=(0.5–1.0)\cdot10^6$ воздействие струйного актуатора на отрывные зоны снижается и наблюдается только когда он находится перед зоной отрыва.

## К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ЛАЗЕРНОГО ЭНЕРГОПОДВОДА В ГАЗОВЫЙ ПОТОК

**Т.А. Киселева[1, 2], Т.А. Коротаева[1], В.И. Яковлев [1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

bobarykina@ngs.ru

Разработана модель численного исследования лазерного энергоподвода в газовый поток, в которой кроме поглощенной энергии также учитывается импульс плазмы пробоя. Величина импульса определяется для режима поглощения излучения за фронтом светодетонационной волны, что реализуется при протяженной фокусировке луча. Представлены результаты численного моделирования лазерного энергоподвода в и сверхзвуковой поток газа. Выявлены отличительные особенности структуры течений с подводом энергии импульсно-периодического излучения $CO_2$-лазера.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00449.

## ДИНАМИКА ПОЛЕТА ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ВЫДУВОМ ПОПЕРЕЧНОЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ

**В.А. Кисловский, В.И. Звегинцев**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

kislovsky_v@mail.ru

Представлены результаты параметрического исследования факторов влияющих на изменение аэродинамических характеристик осесимметричного летательного аппарата (ЛА). Рассмотрено влияние положения отверстия выдува вдоль продольной оси модели ЛА. Рассмотрены степени влияния параметров выдува и набегающего потока. На основе полученных результатов было проведено исследование изменения траектории полета при газодинамическом воздействии.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА В ОБЛАСТИ ПРИМЫКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА К ПЛАСТИНЕ

**Е.В. Колесник, Е.М. Смирнов, А.А. Смирновский**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

aero@phmf.spbstu.ru

Представляются результаты численного моделирования вязко-невязкого взаимодействия, проявляющегося при обтекании сверхзвуковым потоком удлиненного цилиндрического тела, которое примыкает к пластине, пронизывая развивающийся на пластине пограничный слой. Рассматривается ламинарный режим обтекания при числе Маха внешнего потока, равном 2.95. Дается анализ системы возникающих подковообразных вихрей и ударно-волновой картины течения. Приводятся данные сопоставительного тестирования ряда численных схем, предложенных в литературе для расчета сверхзвуковых течений.

## ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ АКУСТИЧЕСКОГО ТИПА НА КОНЦЕВОЙ ВИХРЬ ЗА КРЫЛОМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

**Т.В. Константиновская[1], В.Е. Борисов[1], А.А. Давыдов[1], А.Е. Луцкий[1,2]**

[1]*ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Кафедра вычислительной механики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

konstantinovskaya.t.v@gmail.com

Проведено численное моделированиевлияния возмущений в набегающем потоке на параметры сверхзвукового концевого вихря при числе Маха 2. Возмущения вводились в виде плоских монохроматических волн с малой амплитудой. Моделирование проведено с помощью разработанного авторами программного комплекса для расчета трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа на многопроцессорной системе К-60 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Получены данные о пульсации газодинамических параметров в вихревом следе, в частности, на оси концевого вихря, исследованы частоты и амплитуды возмущений в зависимости от удаления от крыла-генератора.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-08-00909 и№ 19-01-00765.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОТЕРМОДИНАМИКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МОДЕЛЕЙ ГЛА В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

**М.А. Котов, Л.Б. Рулева, С.И. Солодовников**

*Институт проблем механики РАН, Москва*

ruleva@ipmnet.ru

Представлены результаты расчетно-экспериментальных работ по исследованию аэротермодинамики моделей фрагментов летательных аппаратов на числах Маха 5..8. Валидация авторских расчетных кодов выполнена на лабораторной установке Института «Гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба». Приведены примеры сравнения визуализации ударно-волновых структур при обтекании моделей и сравнения расчетных и измеренных значений параметров течений. Экспериментально проверен способ снижения пограничного слоя в сопле.

Работа выполнена по теме государственного задания АААА-А17-117021310372-6.

## О РАСЧЁТЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАНЕЛИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

**А. А. Крайко [1], К. С. Пьянков[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, Москва*

Для ускорения анализа характеристик панелей звукопоглощающих конструкций (ЗПК) при произвольных углах падения акустических волн создана квазиодномерная модель взаимодействия волн с однородной панелью ЗПК при наличии пограничного слоя. Пример использования новой одномерной модели падения волн на панель ЗПК демонстрируется сравнением результатов, полученных в серии прямых нестационарных 2D расчётов, включающих панель с большим количеством ячеек, с результатами, полу-

ченными предложенным подходом. Отличия в полученных значениях малы и соизмеримы с погрешностью счёта, связанной с мощностью сетки в нестационарном 2D расчёте.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 1831-20059, №1701-00126.

## УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ С САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙСЯ (ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ) И ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОЩАДИ

**А.Н. Крайко, Х.Ф. Валиев**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

akraiko@ciam.ru

В одномерном приближении изучена устойчивость стационарных течений идеального газа в каналах переменной площади с самоподдерживающейся ("Чепмена - Жуге") или пересжатой детонационной волной (ДВ). Горючая смесь до ДВ и продукты сгорания за ней – совершенные газы. В таком приближении исследуемые стационарные течения с ДВ Чепмена - Жуге в расширяющемся канале неустойчивы. Для анализа устойчивости стационарных течений с пересжатыми ДВ развит численно-аналитический метод. Проведённые расчёты, продемонстрировав его эффективность, выявили примеры устойчивых течений с пересжатыми ДВ в "двигателеподобных" каналах.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-01-00126 и № 18-31-20059.

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ С УЧЕТОМ ВЗРЫВОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**А. Ю. Крайнов, Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов, И. М. Васенин, Э. Р. Шрагер**

*Томский государственный университет, Томск*

akrainov@ftf.tsu.ru

Представлен газодинамический метод расчета взрывобезопасных расстояний при взрывах метановоздушной смеси в сети горных выработок угольных шахт. Проведены расчеты коэффициентов затухания ударных волн при их взаимодействии с взрывозащитными сооружениями, установленными вблизи зон сопряжения горных выработок. Проанализированы возможности гашения интенсивности ударных волн и управления распространением ударных волн в сети горных выработок угольных шахт путем установки взрывозащитных сооружений.
Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9625.2017/8.9.

## ПОЯВЛЕНИЕ РАЗРЕЖЕНИЯ В ДОЗВУКОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЯХ И ОБРАЗОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ИМИ ТЕЧЕНИЙ

**С.Ю. Крашенинников[1], Л.А. Бендерский [1], А.К. Миронов [1]**

[1] *ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва*

*krashenin@ciam.ru*

На основе результатов измерений и численного моделирования анализируется взаимодействие турбулентных струй (закрученных и без закрутки) с окружающей средой. Показано, что турбулентное течение и закрутка создают условия для индуцированного подтекания к струе. Механизм воздействия струи на окружающую среду связан с понижением статического давления в струе, которое обусловлено либо закруткой потока, либо пульсационным движением в слое смешения. Показано, что характер втекания в струю внешней среды вследствие разрежения не зависит от механизма появления пониженного давления и кинетическая энергия струи является источником энергии для индуцированного течения.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00213а.

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД КРУПНЫХ ЧАСТИЦ, УСТОЙЧИВЫЙ ПРИ РАСЧЕТЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ЗОНАХ НУЛЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

**П.А. Кузнецов**

*Южно-Уральский государственный университет(НИУ), Челябинск*

kuznetcovpa@susu.ru

В данной работе предложена модификация метода крупных частиц. Решены модельные задачи, такие как расчет распада произвольного разрыва, задача о распространении стационарных ударных волн с отражением от жесткой стенки. Было показано, что предложенная модификация метода крупных частиц, наилучшим образом совпадает с аналитическим решениемзадачи об отражении плоской ударной волны от жесткой стенки. Проведенныетесты показали, что данная модификация позволяет проводить устойчивые расчеты течений в зонах нулевых скоростей. Значительным достоинством предложенной модификации является тот факт, что рассмотренные в работе задачи могут быть решены без введения в законы сохранения «искусственной» вязкости, а также при больших числах Куранта.

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ В УДАРНО-СЖАТОЙ БИНАРНОЙ СМЕСИ ГАЗОВ.

**М.М. Кузнецов[1], Ю.Д. Кулешова[1], А.А. Перов[1], Ю.Г. Решетникова[1], Л.В. Смотрова[1]**

[1]*Московский государственный областной университет, Москва*

lilysmotrova@mail.ru

Целью статьи является обоснование аналитической природы высокоскоростного эффекта в ударно-сжатой бинарной смеси газов. Исследованы аналитические свойства этого эффекта. В параллель к ним приведены соответствующие результаты численных исследований других авторов. Дана аналитическая оценка рассматриваемого эффекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00-945А и гранта Президента РФ № МК-3120.2018.9.

## ОПЫТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА РАНКА

**А.Ф. Латыпов[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

latypov@itam.nsc.ru

Дано термодинамическое описание эффекта Ранка. Включение в энергетический обмен работ расширения и сжатия позволяет дать рациональное объяснение наблюдаемому эффекту. Эти работы осуществляются малыми порциями газа в политропических процессах. Вращательное движение газа и наличие необратимостей в процессах расширения и сжатия в совокупности обуславливают энергетическое разделение. Математическая модель построена с использованием законов сохранения и политропического процесса расширения, коэффициент полезного действия работы расширения задается на основе экспериментальных оценок. Выполнены оптимизационные расчеты для различных значений политропического коэффициента полезного действия.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БОЛИДОВ В АТМОСФЕРЕ С ЗАВЕРШАЮЩИМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ВЗРЫВОМ ФРАГМЕНТОВ

**В.Т. Лукашенко[1], В.А. Андрущенко[1], Ф.А. Максимов[1], И.В. Мурашкин[1], Н.Г. Сызранова[1], Ю.Д. Шевелев[1]**

[1]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

lukashenko-vt@yandex.ru

С помощью численных и аналитических подходов сконструирована математическая модель, имитирующая гиперзвуковой полет и разрушение метеорных тел в атмосфере Земли. На ее основе изучено воздействие интенсивных тепловых и силовых факторов на метеороиды, приводящих к их разрушению вплоть до фрагментации. Рассчитано по разработанной сложной вычислительной технологии взаимодействия обтекаемой потоком системы образовавшихся осколков тела, завершаемое заключительным множественным взрывом групп фрагментов.

## ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЖИМА ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ СТЕНКИ НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ ВДУВЕ ГАЗА С ЗАДАННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

**М.С. Макарова, В.Г. Лущик**

*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва*

mariia.makarova@gmail.com

Проведено численное исследование ламинарного сжимаемого пограничного слоя на проницаемой пластине с вдувом газа с заданной температурой для чисел Прандтля $Pr < 1$. При значениях температуры вдуваемого газа ниже температуры адиабатной непроницаемой стенки проведенные расчеты подтвердили существование области температур проницаемой стенки ниже температуры вдуваемого газа. В работе введена величина критической температуры теплоизолированной проницаемой стенки, для которой получена критериальная зависимость от чисел Прандтля и Маха газа набегающего потока.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №19-19-00234).

## ДВИЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ «ГАЗ-ВАКУУМ» ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ

**А.В. Мезенцев[1]**

[1]*Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург*

amezentsev@usurt.ru

В работе рассматриваются трехмерные течения идеального политропного газа, примыкающие к вакууму в условиях действия сил тяготения, Кориолиса и горизонтальной внешней силы.Моделируется течение газапод действием ветровой нагрузки в вертикальной части восходящего закрученного потока типа торнадо с пониженным давлением в центральной части. Исследуется закон движения свободной поверхности – границы «газ-вакуум» и поведение газодинамических параметров на ней.В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики. Закон движения границы «газ-вакуум» определен в параметрической форме из решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

## О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ НА ЭФФЕКТ РАНКА–ХИЛША

**К.И. Михайленко**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

const@uimech.org

В работе рассматривается противоточная вихревая труба и влияние ряда её геометрических параметров на производство холодного воздуха. Для заданной геометрии вихревой трубы проводится вычислительное моделирование при независимом изменении длины основного канала, длины сопла холодного выхода, угла раствора сопла холодного выхода и площади сечения горячего выхода. В ряде вычислительных экспериментов наблюдался аномальный рост температуры выходящего воздуха при некоторых значениях площади горячего выхода. Показан уровень влияния рассмотренных параметров на эффект. Сделаны выводы о диапазоне наиболее приемлемых значений параметров выходов для рассматриваемой конфигурации вихревой трубы.

## ПРИМЕР ЦЕПОЧКИ ВЛОЖЕННЫХ ПОДМОДЕЛЕЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ 5-МЕРНОЙ ПОДАЛГЕБРЫ ИЗ ОПЕРАТОРОВ ПЕРЕНОСА ПО ВРЕМЕНИ, ПЕРЕНОСА, ГАЛИЛЕЕВА ПЕРЕНОСА, ВРАЩЕНИЯ ВОКРУГ ОСИ И РАСТЯЖЕНИЯ

**Т.Ф. Мукминов**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

mukminov.tf@yandex.ru

Рассматривается цепочка вложенных подалгебр 11-мерной алгебры Ли для идеальной модели гидродинамического типа. Для подалгебр выбираются согласованные инварианты. На их основе строится цепочка инвариантных подмоделей. Доказывается, что решения подмодели, построенной по подалгебре большей размерности, будут являться решениями подмоделей, построенных по подалгебрам меньших размерностей из рассматриваемой цепочки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-10071_мк).

## ИНВАРИАНТНЫЕ ПОДМОДЕЛИ РАНГА 1 ОДНОАТОМНОГО ГАЗА С ПРОЕКТИВНЫМ ОПЕРАТОРОМ

**Р.Ф. Никонорова**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение УФИЦ РАН, Уфа*

shayakhmetova.renata@gmail.com

Система уравнений газовой динамики с уравнением состояния одноатомного газа допускает 14-мерную алгебру Ли. Из оптимальной системы неподобных подалгебр рассматриваются трехмерные подалгебры, содержащие проективный оператор. Для этих подалгебр вычисляются инварианты базисных операторов. Если их оказывается достаточно, чтобы выразить через них все искомые функции, то строятся инвариантные подмодели ранга один. Все подмодели стационарного типа. У некоторых подмоделей найдены частные решения, для которых получены траектории движения частиц газа в физическом пространстве.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-10071.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА МИКРОСТРУЙНОГО ВЫДУВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛАСТИНЕ

**А.В. Новиков[1,2], А.В. Фёдоров [2,1]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

AndrewNovikov@yandex.ru

Выполняется прямое численное моделирование вызванных микроструёй пространственных неустойчивостей над плоской пластиной при M=5.4. Уравнения Навье–Стокса решаются неявным методом сквозного счёта с помощью авторского кода HSFlow. Микроструя вносится сверхзвуковым выдувом поперёк потока через отверстие на стенке. Струя приводит к возбуждению неустойчивых волн пограничного слоя, которые растут вниз по потоку и распадаются в турбулентный клин. Это моделирование может помочь разрабатывать активные системы турбулизации при сверхзвуке.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-01295 и с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт»,

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЯХ

**А.Г. Обухов[1]**

[1]*Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

agobukhov@inbox.ru

Представлены результаты численного моделирования генерации свободных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования специальных закручивающих устройств.Исходя из того, что возникающие течения воздуха при локальном нагреве подстилающей поверхности несколькими источниками имеют газодинамическую природу, для описания сложных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа, обладающего диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, используется полная система уравнений Навье-Стокса. Предложенные начальные и граничные условия позволяют в расчетной области в виде куба с

помощью явных разностных схем численно построить решения полной системы уравнений Навье-Стокса, моделирующие трехмерные нестационарные течения газа в концентрированных огненных вихрях.
Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования проект №1.4539.2017/8.9.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИУСТАНОВЛЕННОЙ НА ПОДЛОЖКЕ ПРИЗМЫ

**С.В. Погудалина[1*], Н.Н. Федорова[1,2**]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск*
pogudalina@itam.nsc.ru

В работе представлены результаты численного моделирования несжимаемого турбулентного течения воздуха в окрестности призмы прямоугольного сечения, установленной перпендикулярно внешнему потоку и жестко закрепленнойна подложке. Расчеты выполнены в трехмерной постановке в ПК ANSYS Fluent. Целью работы является сравнение результатов расчетов на основе RANS-подхода, дополненного$k$-$\omega$SST моделью турбулентности, и вихре-разрешающей SAS модели турбулентности. Показано, что SAS модель турбулентности позволяет получит широкий спектр турбулентных пульсаций, в то время как k - ω SST предсказывает только одну частоту срыва вихрей.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00755 А.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭРОТЕРМОДИНАМИКИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

**С.С. Попович[1], Ю.А. Виноградов[1], М.М. Стронгин[1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
pss@imec.msu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования параметроваэротермодинамики при обтеканиисверхзвуковым потокомплоской стенки. Число Маха набегающего потока составило 2.4, температура торможения 294.5 К, критерий Рейнольдса по длине динамического пограничного слоя – не менее $2 \cdot 10^7$ на срезе сопла.Толщина невозмущенного пограничного слоя на срезе сопла –около 6 мм.Представлен график изменения в процессе эксперимента температуры стенки, температуры торможения и температуры зонда, а также распределение температуры торможения по пограничному слою.
Работа выполняется при поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект СП-631.2018.1).

## ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПОДАЧИ ВОЗДУХА, РАСПОЛОЖЕННОЙ СО СТОРОНЫ ГОРЯЧЕГО ВЫХОДА, НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

**Л.Ю. Привалов[1], К.И. Михайленко [2]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*
[2]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*
HungryDoodles@yandex.ru

Рассматривается модификация противоточной вихревой трубы, особенностью которой является дополнительный вдув воздуха по оси трубы со стороны горячего выхода, предназначенном для перераспределения расхода газа на холодном и горячем выходах. Вычислительные эксперименты проведены в программном пакете openFOAMс использованием решателя sonicFoam. Для ускорения расчётов была использована декомпозиция исходной сетки на равные части вдоль трубы, позволяющая выполнить параллельный расчёт.Получены результаты, описывающие влияние длины вихревой трубы на величину температуры и расход воздуха на соответствующих выходах. Сделаны выводы о выборе эффективной длины вихревой трубы.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО СЛЕДА САМОЛЕТА ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Н.А. Баранов [1], А.Н. Корочков [2], А.В. Родыгин [3]**

[1]*ВЦ РАН ФИЦ ИУ РАН, Москва*
[2]*Московский авиационный институт, Москва*
[3]*АО «Бортовые аэронавигационные системы», Москва*
baranov@ians.aero

Представлено описание численной модели расчета структуры вихревого следа за самолетом при его движении вблизи водной поверхности. Приведены примеры расчетов структуры вихревого следа широкофюзеляжного самолета А-380, отражающие особенности формирования вихревых структур за самолетом при полете в различных конфигурациях (с отклонением и без отклонения механизации крыла) в зависимости от удаления от подстилающей поверхности и их влияние на деформацию свободной водной поверхности.

## О СОХРАНЕНИИ ЦИРКУЛЯЦИИ В ТЕЧЕНИЯХ ВЯЗКОГО ГАЗА

**Г.Б. Сизых[1], В.Н. Голубкин [2],В.В. Марков [3]**

[1]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

[3]*Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва*

o1o2o3@yandex.ru

Рассмотрена циркуляция скорости вязкой жидкости (газа) по движущимся контурам, которые образуют ненулевые углы с пересекающими их вихревыми линиями. Получена формула скорости движения контура, при котором циркуляция скорости жидкости по нему остается постоянной. Скорость движения контура вычисляется через параметры течения и их производные, а также через единичный касательный к контуру вектор.В результате известная теорема Томсона о циркуляции скорости в идеальной баротропной среде обобщена на случай вихревых течений вязкой несжимаемой жидкости и вязкого сжимаемого газа.

## ОБ ОДНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ Л.В. ОВСЯННИКОВА

**К.Б. Сабитов**

*Стерлитамакский филиал Института стратегических исследований РБ, Стерлитамак;*
*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, Стерлитамак*

sabitov_fmf@mail.ru

В работе для уравнения Чаплыгина поставлена обобщенная задача Трикоми, т.е. задача с отходом от характеристики в варианте Л.В. Овсянникова. Получена теорема единственности решения этой задачи без каких-либо ограничений неравенственного характера на эллиптическую часть границы области и на коэффициент уравнения Чаплыгина. Как следствие получена единственность решения задачи Трикоми без указанных выше ограничений для уравнения Чаплыгина.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-020516.

## ГИСТЕРЕЗИС ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНЫ ПОД УГЛОМ АТАКИ

**М.М. Симоненко, С.В. Гувернюк, А.Ф. Зубков**

*НИИ механики МГУ, Москва, Россия*

sim1950@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны прямоугольного сечения на цилиндроконическом теле под углом атаки. С использованием технологии непрерывного изменения протяженности каверны и угла атаки в потоке определены границы области гистерезиса, в пределах которых наблюдаются различные режимы обтекания каверны. На основе данных визуализации и измерения давления изучена эволюция структуры течения, включая режимы перестройки на границах области гистерезиса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 19-01-00242.

## ОТРЫВНЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ УДЛИНЕННЫХ ТЕЛ

**М.М. Симоненко[1], А.Г. Кузьмин[2]**

[1]*НИИ механики МГУ, Москва*

[2]*СПбГУ, Санкт-Петербург*

sim1950@mail.ru

Представлены результаты численного исследования сверхзвукового обтекания удлиненного осесимметричного цилиндроконического тела под углами атаки. Идентифицированы отрывные и вихревые структуры на подветренной стороне тела. Установлено, что при углах атаки 8° и 15° у подветренной поверхности тела формируется узко локализованный сверхзвуковой поток, полное давление которого сопоставимо по величине с полным давлением набегающего потока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00242.

## ИНВАРИАНТНЫЕ ПОДМОДЕЛИ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПАРАНГА 2 И 1

**Д.Т. Сираева**

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова *УФИЦ РАН, Уфа*

sirdilara@gmail.com

Рассматриваются уравнения гидродинамического типа с уравнением состояния в виде давления, равного сумме функций плотности и энтропии. Системе соответствует 12-мерная алгебра Ли. По 2-мерным и 3-мерным подалгебрам построены инвариантные подмодели ранга 2 и 1. Получено семейство точных решений по инвариантной подмодели ранга 2, задающее разлет движения частиц от источника к вакууму.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-10071 и частично средствами государственного бюджета по госзаданию (№ 0246-2019-0052).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОТОКЕ

**Н.П. Скибина[1], В.В. Фарапонов [1], Е.А. Маслов [2]**

[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

[2]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

uss.skibina@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования, направленного на изучение сверхзвукового и гиперзвукового обтекания тел в рабочей части импульсной аэродинамической установки. Приведены результаты физического моделирования обтекания плоских и осесимметричных моделей разной геометрии и результаты соответствующих им численных расчетов, проведенных с целью формирования более полной картины изучаемого процесса.

Работа проведена при финансовой поддержке гранта РНФ № 15-19-10014.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЛНОЛЕТЫ НА ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

**С.С. Страдомский[1], Н.А. Остапенко[1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

ostap@imec.msu.ru

Представлены результаты аналитического и численного исследования задачи о волнолете максимального аэродинамического качестваК на плоской ударной волне при заданных удельном объеме, коэффициенте подъемной силыи угле скоса донного среза. Определена форма оптимального волнолета в плане при различных комплексах определяющих параметров, в частности, при ограничении на тепловой поток к передней кромке. Показано, что оптимальная форма зависит только от состояния пограничного слоя, а угол скоса донного среза существенно влияет на величину К.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00182).

## ОПТИМИЗАЦИЯ НАВЕТРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**С.А. Таковицкий [1], В.Ф. Виллас [2]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

[2]*Европейское космическое агентство, Нидерланды*

c.a.t@tsagi.ru

Рассмотрена задача уменьшения аэродинамических потерь на балансировку высокоскоростного аппарата на режиме крейсерского полета. На основе метода локальной линеаризации выполнена оптимизация наветренной поверхности и дано сопоставление оптимальных аэродинамических форм для нескольких положений центра тяжести. Исследовано направление уменьшения сопротивления, связанное с размещением балансировочного груза.

Работа выполнена в рамках проекта "Высокоскоростной экспериментальный летательный аппарат - International" (HEXAFLY-INT), способствующего международному сотрудничеству в области исследований Гражданского высокоскоростного воздушного транспорта. Программа HEXAFLY-INT, координируемая EKA-ESTEC, поддерживается ЕС в рамках 7й Рамочной программы: Тема 7 Транспорт, контракт№.ACP3-GA-2014-620327. Проект также поддерживается Министерством промышленности и торговли Российской Федерации. Более подробную информацию о HEXAFLY-INT можно найти на http://www.esa.int/techresources/hexafly_int. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-01-00671.

## ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ЧАСТИЦ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ЗА ПРОХОДЯЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

**П.С. Уткин[1], Д.А. Сидоренко[1], В.М. Бойко[2]**

[1]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

[2]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

pavel_utk@mail.ru

Рассмотрена задача о динамике движения двух частиц в сверхзвуковом потоке газа за проходящей ударной волной. Для моделирования использован параллельный метод декартовых сеток для расчета течений в областях с изменяющейся геометрией. Описаны основные стадии процесса с точки зрения реализующихся ударно-волновых конфигураций. Получен эффект смены двух режимов сверхзвукового обтекания двух тел. Полученные картины течения и динамика движения частиц соответствуют экспериментальным данным.

Исследования П.С. Уткина и Д.А. Сидоренко выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект № 19-38-70002). Расчеты проводились на суперкомпьютере МВС-10РМСЦ РАН.

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИН ВБЛИЗИ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА НА ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

**В.А. Фролов [1], А.С. Козлова [1]**

[1]*Самарский университет, Самара*

frolov_va_ssau@mail.ru

Представлены теоретические и экспериментальные результаты исследования влияния различных комбинаций плоских пластин вблизи круглого цилиндра на лобовое сопротивление. Исследуется влияние различных расположений пластин на величину лобового сопротивления комбинации цилиндр-пластины. На основе численного моделирования и эксперимента в аэродинамической трубе получены результаты для коэффициента лобового сопротивления системы тел цилиндр-пластины. Показано, что величина коэффициента лобового сопротивления системы цилиндр-пластины меньше соответствующей величины коэффициента лобового сопротивления изолированного цилиндра.

## ПЛОСКИЕ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИЕ ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

**С.В. Хабиров**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

habirov@anrb.ru

Элементы группового анализа приведены для подмодели плоских установившихся изоэнтропических течений газа. Решена задача групповой классификации по произвольным элементам уравнению состояния и значениям интегралов: Бернулли и вихря. Построены оптимальные системы подалгебр для двух четырехмерных алгебр Ли, возникающих при групповой классификации. По оптимальной системе проведена классификация инвариантных решений для некоторых случаев групповой классификации. Дана физическая интерпретация некоторых решений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-10071).

## ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ С КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКОЙ

**Д.Е. Хазов[1], А.И. Леонтьев[1,2],Ю.А. Виноградов[1]**

[1]*НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

dkhazov@mail.ru

Одномерные модели газовой динамики и теории тепломассообмена используются при анализе течений, параметры которых зависят от одной пространственной переменной. Подобные модели оперативно и с достаточной точностью предсказывают изменение параметров потока. В стационарном случае такие течения описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями. При скоростях близких к звуковым, течение может переходить через скорость звука, т.е. проходить через критическую точку. С математической точки зрения это вызывает трудности. В работе рассматривается метод преодоления указанных трудностей на примерах течения в канале произвольного сечения при наличии трения, тепло- и массообмена.

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ УГЛА СЖАТИЯ В ПРИСУТСТВИИ РЕГУЛЯРНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ ТИПА ГЁРТЛЕРА

**П.В. Чувахов[1,2], В.Н. Радченко [1], Е.А. Александрова [1,2]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

pavel_chuvahov@mail.ru

В ударной аэродинамической трубе УТ-1М (ЦАГИ) исследовано влияние вихрей типа Гёртлера на теплообмен в области присоединения гиперзвукового течения на отклонённой поверхности угла сжатия 15°, число Маха 8. Вихри возбуждаются рядом цилиндрических неровностей постоянной высоты, размещённых по размаху пластины перед отрывной зоной. Высота неровностей определяет интенсивность вихрей. Рассматриваются результаты экспериментов при числе Рейнольдса $Re_{\infty,L}=(1.75\pm0.09)\times10^5$ по длине острой пластины до линии излома, когда течение в области присоединения близко к ламинарному. Количественно показано увеличение среднего по размаху модели уровня и амплитуды колебаний теплового потока, обусловленных вихрями.

Работа выполнена в ЦАГИ при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00567.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСТАБИЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКИ В РАМКАХ ВИХРЕРАЗРЕЩАЮЩИХ ПОДХОДОВ

**А.Ю. Чулюнин**

*НИИ механики МГУ, Москва*

chulyu-n@mail.ru

В рамках численного моделированиясиспользованием методов IDDESи URANS исследуется структура турбулентного потока при обтекании овально-траншейных лунок различного удлинения (L/R). Выявлено, что для лунок с L/R<3течение характеризуется апериодическим чередованием «левостороннего» и «правостороннего» состояния. Показано, что данный эффект можно воспроизвести только в рамках вихреразрешающих подходов. Удлинение лунки приводит к перестройке потока и формированию симметричных структур. Отмечено, что для переключательных режимов характерны большие времена осреднения нестационарных полей скоростей и давления. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10075.

## О СИНГУЛЯРНЫХ РЕШЕНИЯХ УРАВНЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНОГО И ТРЕХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ

**В.И. Шалаев**

*Московский физико-технический институт, Москва*

vi.shalaev@yandex.ru

Обсуждены особенности решениq уравнений нестационарного и трехмерного пограничных слоев. Возникновение особенностей обусловлено разрывом краевых условий или столкновением двух семейств линий тока, а также появлением отрыва. Рассмотрены проблемы, связанные с этими явлениями и пути их устранения. Получены явные решения для внешней и пристеночной частей пограничного слоя и исследованы их особенности. На основе уравнений Навье-Стокса построены асимптотические структуры течения. Эти результаты важны для понимания свойств различных аэродинамических течений, а также для построения эффективных численных моделей.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЯДРЕ КОНЦЕВОГО ВИХРЯ И ЕГО ОКРЕСТНОСТИ НА БОЛЬШОМ УДАЛЕНИИИ ОТ КРЫЛА

**А.М. Шевченко[1], В.Е. Борисов [2], А.А. Давыдов [2], Т.В. Константиновская [2], А.Е. Луцкий [2], А.С. Шмаков [1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

shevch@itam.nsc.ru

При числе Маха M=2-4 и угле атаки крыла 10 градусов впервые получены данные о положении и размерах вихревого ядра, газодинамические характеристики течения, характеризующие развитие продольного вихря на больших удалениях от крыла вниз по потоку. Показано, что положение максимумов окружного числа Маха, соответствующих границам вихревого ядра, совпадает с положением максимумов в распределении среднеквадратичных пульсаций. Обнаружено, что вихревое ядро меандрирует, смещаясь по мере удаления вниз по потоку вниз и вверх, к и от концевой хорды крыла.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00765.

## ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА СВЕРХЗВУКОВОЙ ФЛАТТЕР ПЛАСТИНЫ

**А.С. Шишаева [1,2], В.В.Веденеев[1], Г.Б.Сушко[2], А.А.Аксенов[2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2] *ООО «Тесис», Москва*

anastasiashishaeva@rambler.ru

Исследуется влияние кратковременного возмущения на изменение формы колебаний пластины при сверхзвуковом флаттере. Рассматривается флаттер, возникающий в потоке газа, движущегося с постоянной скоростью, в монотонно ускоряющемся и монотонно замедляющемся потоке. Возмущение прикладывается как в начале колебаний, так и при выходе колебаний на предельный цикл. Задача решается с помощью численного моделирования в программных комплексах Abaqusи FlowVision.Анализируются условия перестроения колебаний с одного предельного цикла на другой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-01-00404.

## ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЯДРЕ ПРОДОЛЬНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ВИХРЯ И ЕГО ОКРЕСТНОСТИ

**А.С. Шмаков, А.М. Шевченко**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

shmakov@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования вихревого следа за прямым полукрылом. Измерения выполнены термоанемометром постоянного сопротивления на удалении X/b=0,5÷8,33 при M=2,5÷4. Показано, что течение в ядре продольного сверхзвукового вихря сопровождается падением величины массового расхода и максимумом пульсаций на его границе. В ближнем следе показано хорошее совпадение полученных данных с результатом пневмометрических измерений и результатами численного моделирования.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ № 19-01-00765 и частично в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (№ АААА-А17-117030610125-7).

## ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ПОДМОДЕЛИ НА 4-Х МЕРНОЙ ПОДАЛГЕБРЕ

**Ю.В. Юлмухаметова[1,2]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

tarasova_yulya@mail.ru

Рассматривается 4-х мерная подалгебра с номером 4.47 из 11-мерной алгебры Ли. Инварианты этой подалгебры задают представление решения для уравнений газовой динамики в декартовой системе координат. После подстановки представления решения изу-

чена совместность полученной системы дифференциальных уравнений. Система совместна и имеет точное решение. Полученное решение описывает прямолинейный разлет частиц газа.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-10071_мк.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ И ТЕПЛОВОМУ ПОТОКУ ТЕЛА В РАЗРЕЖЕННОМ ГАЗЕ

**Г.Е. Якунина[1]**

[1]*Государственный университет управления, Москва*

galina_yakunina@mail.ru

В приближении свободномолекулярного течения газа при максвелловском распределении скоростей молекул газа в поле течения решены задачи о формах тел минимального сопротивления и тел с минимальным тепловым потоком в разреженном газе. Решения получены для высокоскоростного движения тел без упрощающих ограничений на их форму при любых комбинациях моделей диффузного и зеркального отражения молекул газа от поверхности тела. Показано, что подходы, которые использовались ранее при решении подобных задач с упрощениями на толщину тела и модель взаимодействия с газом, ведут к потере решений и дают качественно неверную информацию о структуре поверхности оптимальных тел.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В ОБЛАСТЯХ С ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЕЙ

**А.Н. Якунчиков[1,2,3], В.В. Косьянчук[1,2,3]**

[1]*Механико-математический ф-т МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва*

[2]*Институт механики МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва*

[3]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

art-ya@mail.ru

В работе изучается задача о нестационарном течении смеси газовв переходном режиме в области с подвижной границей. Интерес к данной постановке вызван поиском новых принципов газоразделения, которые можно реализовать на практике в виде микроэлектромеханической системы (MEMS). Для исследования использовался метод событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD), обобщенный авторами на случай, когда расчетная область имеет подвижные границы (подвижные элементы устройства). Предложен и исследован новый принцип работы разделительного устройства, коэффициент разделения которого существенно выше, чем у диффузионного метода. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-10227.

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА НА ТЕМПЕРАТУРУ И ТЕПЛОВОЙ ПОТОК НА ПЛАСТИНЕ

**Г.В. Никифоров, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, Р.С. Хоронжук**

*Санкт-Петербургский Государственный Университет*

nikiforov1996@gmail.com

Было исследовано влияние плотностной неоднородности набегающего сверхзвукового потока на температуру и тепловой поток на пластине, установленной под углом к направлению потока. Плотностная неоднородность достигалась введением в основной поток воздуха тонкой струи гелия. Зафиксирована перестройка течения возле модели, возникающая в следствие взаимодействия плотностной неоднородности с ударной волной. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00707.

## НОВЫЕ АНАЛОГИ УРАВНЕНИЙ ЧАПЛЫГИНА

**А.И. Рылов**

*Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Новосибирск*

rylov@math.nsc.ru

Здесь под аналогами уравнений Чаплыгина понимаются однородно-дивергентные системы, сдержащие по одному однородному идивергентному уравнению. Каждая такая система легко допускает заменуместами зависимых и независимых переменных, например прииспользовании плоскостей потенциала и годографа, а также допускаетнеограниченное число частных решений.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-10071_мк.

## ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛА РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

**Ю. А. Максакова, В. А. Лашков, Г. В. Никифоров, И. Ч. Машек, Р. С. Хоронжук**

*Санкт-Петербургский государственный университет,*

*st048798@student.spbu.ru*

Моделируется взаимодействие неоднородности набегающего потока с головной ударной волной на телах различной формы. Неоднородность создается при помощи внедрения в основной поток тонкой трубки с газом меньшей плотности, что позволяет изучить стационарный процесс взаимодействия неоднородности набегающего потока с головной ударной волной. Приведены экспериментальные данные по визуализации течения и измерению аэродинамических сил, действующих на тела различной формы. Показана возможность значительного уменьшения сопротивления, а также способа создать подъемную силу и момент при внеосевой ориентации неоднородности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00707.

## Подсекция II-3. УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

### НОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬТОНКОГО ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА В ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

**Р.В. Акиньшин[1], В.Ф. Копьев [1], С.А. Чернышев [1]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Москва*

akinshinrv@mail.ru

В линейном приближении рассматривается задача об устойчивости тонкого вихревого кольца в идеальной жидкости. Рассматривается изохронное вихревое кольцо, у которого период обращения жидких частиц внутри ядра постоянен и которое имеет только возмущения дискретного спектра. Для получения решения проведено сшивание внутреннего и внешнего решения линеаризованных уравнений на границе ядра вихревого кольца и получено дисперсионное уравнение с точностью до третьего порядка по малому параметру. Была обнаружена новая неустойчивость, механизм которой связан с взаимодействием различных возмущений в ядре, имеющих энергию разного знака.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01271.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРА СТОХАСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

**А.В. Александров[1], Л.В. Дородницын[2], А.П. Дубень[1]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

dorodn@cs.msu.su

Рандомизированный спектральный метод, ранее предложенный для генерации однородных изотропных турбулентных полей скорости, обобщается на трехмерный случай. Аналитически и численно демонстрируется совпадение статистических и спектральных свойств турбулентных полей, искусственно сгенерированных на основе данного метода,со свойствами их физических прототипов. Анализируется влияние различных способов учета зависимости от времени на вид автокорреляционной функции. Валидационный LES расчет, использующий полученные турбулентные поля в качестве начальных условий, демонстрирует хорошее совпадение результатов с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00726-А.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В КОМПАКТНЫХ ГАЗОВЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

**А.В. Бабаков**

*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

babakov@icad.org.ru

Методами математического моделирования исследуются вихревые движения, возникающие в компактных газовых астрофизических объектах, находящихся в условиях самогравитации. Осуществляется моделирование конвективных процессов с образованием крупномасштабных вихревых структур в массивных звездах и звездах, обладающих вращением. Приводятся визуализированные картины вихревой структуры объектов.При моделировании используется прямое вычисление гравитационных силпосредством суммирования взаимодействия между всеми конечными объемами в области интегрирования. Эволюционные расчеты осуществляются на основе параллельных алгоритмов, реализованных насуперкомпьютерах кластерной архитектуры.

### ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ВЫСОКИХ ДОЗВУКОВЫХ ЧИСЛАХ МАХА

**С.А. Баранов, Г.Г. Гаджимагомедов, А.В. Ливерко, Д.С. Сбоев, В.Г. Судаков**

*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

t124@inbox.ru

В докладе приводятся результаты экспериментов по исследованию обтекания прямого крыла (дужки) в трансзвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ Т-128. Представлены данные по ламинарно-турбулентному переходу в пограничном слое при числах Маха от 0.2 до 0.79, полученные при помощи пленочных датчиков термоанемометра на поверхности модели. Обнаружено, что в естественных условиях в установке Т-128 наблюдается К-режим перехода в пограничном слое.

### ИЗМЕРЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЦИЛИНДР, ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВОКРУГ ОСИ,ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ЕГО ОБРАЗУЮЩЕЙ

**С.А. Баранов, Г.Г. Гаджимагомедов, Г.Я. Масленников, Д.С. Сбоев, С.Н. Толкачев**

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский*

tolkachevst@gmail.com

В аэродинамической трубе проведены измерения аэродинамических сил, действующих на цилиндр, вращающийся перпендикулярно его образующей с помощью двух методик. Зависимость средней поперечной к направлению набегающего потока силы от его скорости и частоты вращения цилиндра не согласуется с классическим выражением для силы Магнуса для шара/сферы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СЕКЦИОНИРОВАННОГО ОТСОСА ПРИ ОТКАЗЕ ОДНОЙ ИЗ СЕКЦИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ ЛАМИНАРИЗАЦИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ОБЛАСТИ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА

**С.А. Баранов, А.Ф. Киселев, Д.С. Сбоев, С.Н. Толкачев**

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский*

tolkachevst@gmail.com

В малотурбулентной аэродинамической трубе проведены исследования системы ламинаризации трехмерного пограничного слоя с помощью секционированного отсоса в штатном режиме работы, при отказе одной из секции и в аварийном режиме работы, когда эффективность ламинаризации наращивалась путем увеличения скорости отсоса в соседних секциях. Исследования показали, что для компенсации потери ламинаризующей эффективности требуется значительно увеличить расход в соседних секциях.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ НА ПУЛЬСАЦИИ СЛОЯ СМЕШЕНИЯ СТРУИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ОТКРЫТОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТЬЮ

**Н.И. Батура, Г.Г. Гаджимагомедов, Г.Я. Масленников**

*Центральный Аэрогидродинамический Институт им. Проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

gadji_@mail.ru

В работе проведено экспериментальное исследование влияния двух типов вихрегенераторов, установленных на срезе сопла на пульсации скорости в слое смешения струи аэродинамической трубы с рабочей частью в виде камеры Эйфеля. Первый тип представляет собой две прямоугольные пластинки, установленные симметрично у верхней и нижней кромки сопла по всей его ширине. Исследовано влияние угла установки пластинок, а также глубины их выдвижения в поток. Второй тип вихрегенераторов представляет собой треугольные пластинки, равномерно распределенные по периметру сопла. Угол установки пластинок по отношению к потоку на выходе из сопла варьировался. Измерения пульсаций скорости в слое смешения проведены с помощью метода PIV. Определены наиболее оптимальные с точки зрения уменьшения пульсаций скорости конструктивные параметры рассмотренных типов вихрегенераторов.

## НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В ЖИДКИХ ПЛЕНКАХ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ЭФФЕКТАМИ МАРАНГОНИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖИДКОСТИ

**А.Н. Белоглазкин, В.Я. Шкадов**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

bel@mech.math.msu.su

На основе уравнений для интегральных характеристик пленочного течения исследованы стационарные течения, их гидродинамическая устойчивость и нелинейные волны при учете физических факторов: граничного потока газа; диффузии, адсорбции-десорбции и испарения ПАВ; большой вязкости жидкости. В зависимости от управляющих параметров определены режимы течений и виды неустойчивых возмущений. С использованием ряда весовых функций из уравнений пограничного слоя выведена последовательность систем эволюционных уравнений, проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-01-00762, 18-51-00006.

## ОСОБЕННОСТИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИОПУСКНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПОПЕРЕЧНОММАГНИТНОМ ПОЛЕ

**И.А. Беляев[1], Д.А. Бирюков[1], П.А. Сардов[1], Н.Г. Разуванов[2], В.Г. Свиридов[2]**

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

[2]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

bia@ihed.ras.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей смешанной конвекции при опускном течении жидкого металла в вертикальной трубепод действием поперечного магнитного поля в условиях неоднородного обогрева. При определённых условиях и конфигурациях МГД-теплообмена, термогравитационная конвекция вызывает низкочастотные пульсации температуры аномальной амплитуды.В сечении трубы измеряется температура, скорость и их статистические характеристики. Полученные данные представлены в видераспределений температуры и температурных пульсаций.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ №14.Z50.31.0042.

## ИССЛЕДОВАНИЕ RANS/ILES МЕТОДОМ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ СМЕШЕНИЕМ В НЕРАСЧЕТНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ

**Л.А. Бендерский [1], Д.А. Любимов [1], Н.А. Польняков[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения, Москва*

pilotnikita@gmail.com

С помощью RANS/ILESметода высокого разрешения исследовано влияние режимных параметров синтетических струй на характеристики течения и турбулентности двух нерасчетных сверхзвуковых струй с различной температурой. В работе показана принци-

пиальная возможность использования синтетических струй для уменьшения начального участка сверхзвуковых струй. Продемонстрировано два механизма воздействия синтетическими струями на основной поток: формирование парных вихрей в сдвиговом слое холодной струи и в ядре потока горячей струи.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00271.

## О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ПОЛОЖЕНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ

**А.В. Бойко[1,2], К.В. Демьянко[1,3], А.В. Иванов [1], С.В. Кириловский [1], Д.А. Мищенко [1], Ю. М. Нечепуренко [1,3], Т.В. Поплавская [1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Тюменский государственный университет, Тюмень*

[3]*Институт вычислительной математики имени Г.И. МарчукаРАН, Москва*

boiko@itam.nsc.ru

Рассматриваются актуальные фундаментальные и вычислительные проблемы нахождения положения ламинарно-турбулентного перехода в аэродинамических течениях. Дается обзор современных популярных методов инженерного прогноза перехода к турбулентности в условиях обтекания двумерных и трехмерных аэродинамических конфигураций на до- и трансзвуковых скоростях. Описывается развиваемый авторами подход на основе exp(N)-метода и освещаются результаты экспериментальных и численных работ, направленных на уточнение калибровки этого метода для ряда сложных течений.Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00460

## СИСТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГЁРТЛЕРОВСКИХ МОД С ПОМОЩЬЮ СТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА

**В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Ю.С. Качанов, Д.А. Мищенко [1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

D.A.Mischenko@itam.nsc.ru

В работе представлены результаты первого систематического экспериментального исследования эффективного механизма управления развитием быстрорастущих нестационарных гёртлеровских мод (безразмерный поперечный масштаб $\Lambda$ = 147, 270, 416; частотный параметр $F$ = 5,7; 10,3; 14,9), за счет модификации пограничного слоя на вогнутой поверхности высокоамплитудными квазистационарными (физически стационарными) вихрями Гёртлера ($\Lambda$ = 147; $F$ = 2,3). Измерения проведены в диапазоне чисел Гёртлера $G^*$ = 14,6 – 23,2. Возможность сильного подавления скоростей нарастания управляемых возмущений зафиксирована во всех девяти изученных режимах.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-10179.

## ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ОКРЕСТНОСТИ СТРЕЛОВИДНОЙ КРОМКИ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

**А.В. Ваганов[1], А.Ю. Ноев[1], В.Н. Радченко[1], А.Д. Косинов[2]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

[2]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. ХристиановичаСО РАН, Новосибирск*

anton.noev@tsagi.ru

В трубе Людвига УТ-1М при числе Маха 6 и 8 проведены эксперименты по обтеканию плоской треугольной пластины с полуцилиндрическими стреловидными кромками и острым носком. Варьировался угол скольжения пластины и число Рейнольдса. С помощью люминесцентныхпреобразователей температуры получены поверхностные распределения теплового потока. Выявленыхарактерные зоны и особенности течения при различном состоянии пограничного слоя на линии растекания. Получены количественныеданные по тепловому потоку в зависимости от различных параметров. Зафиксирован значительно более ранний естественный ламинарно-турбулентный переход на линии растекания, чем по некоторым данным из литературы.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-01-00743 и 17-01-00129.

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПОТОКИ И ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ КРУПНОМАСШТБАНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

**А.Ю. Васильев[1], П.Г. Фрик[1], A.Kumar[2], Р.А. Степанов[1], А.Н. Сухановский[1], M.K.Verma[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь*

[2]*Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India*

vasiliev.a@icmm.ru

Впервые мы явно показали, что переориентация крупномасштабной циркуляции (КМЦ) в кубической полости сопровождается азимутальными потоками с ненулевым полным угловым моментом. Так же показано, что вращение жидкости, как твердого тела, не осуществляется. Обнаружено, что корреляция между вращением плоскости КМЦ и средним азимутальным движением высокая во время квазипериодических колебаний и относительная слабая во время переориентации. В рамках нового подхода рассматривают-

ся переориентации КМЦ в турбулентном конвективном потоке Рэлея – Бенара в кубической полости, в котором КМЦ описывается как суперпозиция пары крупномасштабных ортогональных валов. Переориентация КМЦ происходит в результате остановки одного из квази-2D валов.

Работа выполнена прифинансовой поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края № С-26/788).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛАМИНАРНОЙ СТРУЕ

**В.В. Веденеев, Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

vasily@vedeneev.ru

Затопленные струи повсеместно встречаются в природе и различных приложениях. По сравнению с турбулентными струями, ламинарные струи изучены слабо из-за их быстрого разрушения в нормальных условиях. Ранее в работах авторов (Изв.РАН МЖГ и Physics of Fluids, 2018) продемонстрирован новый метод формирования свободных струй с длиной ламинарной областью при числе Рейнольдса ~10000.В настоящей работе исследуется развитие осесимметричных возмущений в круглой ламинарной струе. Возмущения вводятся с помощью тонкого колеблющегося металлического кольца. Экспериментальные результаты сравниваются с результатами линейного анализа устойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00745.

## УСТОЙЧИВОСТЬ И БИФУРКАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВДВУМЕРНОГО ДВОЯКОПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

**И.И. Вертгейм [1], Р.В. Сагитов[2], А.Н. Шарифулин [3]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

[3]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

wertg@icmm.ru

Численно исследовано двумерное течение вязкой несжимаемой жидкости в плоской прямоугольной области, вызванное периодической по пространственным координатам и постоянной по времени силой. Задача формулируется в терминах двухполевого метода и аппроксимируется конечными разностями. Стационарные решения получены многомерным методом Ньютона и исследованы на устойчивость относительно малых возмущений. Изучены структурные перестройки различных стационарных режимов и построены карты устойчивости в зависимости от определяющих параметров - величин расхода (чисел Рейнольдса) в перпендикулярных направлениях и амплитуды силы. Показана возможность колебательной неустойчивости основного состояния.

## ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН НА ТЕПЛОВУЮ КОНВЕКЦИЮ В ТОЛСТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ПРИ ВРАЩЕНИИ

**А.А. Вяткин[1], В.Г. Козлов[1], Р.Р. Сабиров[2]**

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

[2]*Пермскийнациональный исследовательский политехнический университет, Пермь*

vjatkin_aa@pspu.ru

Экспериментально исследуется тепловая конвекция во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое жидкости. Рассматривается случай толстого слоя, разогреваемого изнутри. Изучаются пороги возбуждения термовибрационной конвекции. Обнаружено, что инерционные волны при взаимодействии с границами слоя оказывают влияние на азимутальное движение жидкости. В полости формируется система тороидальных вихрей, периодически расположенных вдоль оси вращения. Показано, что допороговые конвективные течения оказывают значительное влияние при больших перепадах температуры. Р

абота выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ 3.9053.2017/БЧи при частичной поддержке правительства Пермского края (Проект С-26/174.9).

## ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ОДНОСВЯЗНОМ НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КОАКСИАЛЬНОМ ЗАЗОРЕ

**А.А. Вяткин, В.Г. Козлов**

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

vjatkin_aa@pspu.ru

В работе экспериментально изучается осредненная тепловая конвекция жидкости во вращающемся секторе тонкого цилиндрического слоя с границами разной температуры в случае высокочастотной модуляции скорости вращения. Показано, что азимутальные колебания вращающегося слоя приводят к проявлению двух независимых механизмов вибрационной конвекции, линейного и квадратичного по температурной неоднородности плотности. В этом случае, с учетом центробежной силы, тепловая конвекция определяется двумя вибрационными безразмерными параметрами, а также центробежным числом Рэлея и безразмерной скоростью вращения полости. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 18-71-1005).

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛЕДА ОТ ЦИЛИНДРОВ: ВАРИАНТ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРО-РАЗРЯДНОГО ЭФФЕКТА

**Г.В. Гембаржевский, А.К. Леднев, К.Ю. Осипенко**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

gvgemb@ipmnet.ru

Ранее авторами был обнаружен эффект перестройки ближнего следа от пары цилиндров под действием тлеющего разряда: В спектре пульсаций скорости течения возникал и становился с ростом тока разряда доминирующим второй пик. Для физического истолкования обнаруженного эффекта построена модель следа в форме нелинейно-связанных осцилляторов-дорожек Кармана за каждым цилиндром. Показано, как в рамках модели растущая стохастизация следа приводит к появлению вторичного пика в спектре пульсаций скорости и к нивелировке первичного пика.

## БЛОК ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА LOTRAN

**К.В. Демьянко[1,2], А.В. Бойко[3,4], Ю.М. Нечепуренко [1,2]**

[1]*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, Москва*

[3]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[4]*Тюменский государственный университет, Тюмень*

kirill.demyanko@yandex.ru

Обсуждаются основные элементы оригинальной технологии на основе exp(N)-метода, предназначенной для расчета положения ламинарно-турбулентного перехода при обтекании трехмерных аэродинамических конфигураций на до- и сверхзвуковых скоростях, которая реализована в виде программного блока LOTRAN (LocalTRansitionANalysis). Результаты работы блока иллюстрируются на примерерасчета положения ламинарно-турбулентного перехода для различных течений и сравниваются с известными экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-20149 (разработка и реализация метода решения частичных проблем собственных значений, его адаптация к использованию в рамках блока LOTRAN).

## КОНВЕКЦИЯ МАРАНГОНИ В СИСТЕМАХ ЖИДКОСТЕЙ РАВНОЙ ПЛОТНОСТИ

**М.О. Денисова, К.Г.Костарев**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

mod@icmm.ru

В докладе представлены результатыверификации теоретического решения двух задач о конвекции Марангони, возникающей при диффузии ПАВсквозь межфазную границу. Специфика исследования связана с использованием систем, в которых контактирующие жидкости имеют исходную плотность, совпадающую с плотностью ПАВ.Рассмотрено поведение двух смесей с неоднородным распределением ПАВ, заполняющих горизонтальный канал и имеющих вертикальную межфазную границу. Проанализирована связь конвекции Марангони и формы капли, плавающей в жидкости с вертикальным градиентом плотности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-01-04842,19-41-590009, а также Правительства Пермского края № С-26/788.

## ВЛИЯНИЕ АСПЕКТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ТЕПЛООБМЕН ОТ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

**А.В. Евграфова[1], А.Н. Сухановский[1]**

[1]*Институт механики сплошных средПФИЦ УрО РАН, Пермь*

eav@icmm.ru

В данной работы представлены результаты экспериментального исследования процессов теплообмена в неоднородно нагретом горизонтальном слое жидкости. Эксперименты были выполнены в диапазоне чисел Рэлея от $3.4\cdot10^5$ до $4.5\cdot10^7$ и различных чисел Прандтля (38, 67, 209). Особое внимание было уделено влиянию аспектного отношения (отношение высоты слоя жидкости к диаметру нагревателя) на структуру течения и интенсификацию теплопереноса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и правительства Пермскогокрая (проекты РФФИ-Урал № 17-45-590846 р_а и С-26/788).

## ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА

**Ю.Г. Ермолаев[1], А.А. Яцких [1, 2], Н.В. Семенов [1], А.Д. Косинов [1, 2]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

yermol@itam.nsc.ru

Представлены экспериментальные данные эволюции искусственно возбужденного волнового пакета в пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2,0. Волновой пакет генерировался импульсным разрядом на поверхности модели. В экспериментах использовался термоанемометр. Проведен спектрально-волновой анализ развития измеренных возмущений. Сделаны оценки скорости распространения волнового пакета вниз по потоку. Полученные результаты демонстрируют линейное развитие волнового пакета в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610125-7).

## АСИМПТОТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНОГО ВТОРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

**В.Б. Заметаев**[1,2]

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*

[2]*ВЦ им ак. А.А. Дородницына, ФИЦ «Информатика и Управление» РАН, Москва*

zametaev.vb@mipt.ru

Изучен турбулентный пограничный слой вязкой несжимаемой жидкости на плоской пластине. Характерное число Рейнольдса потока считается большим, а пограничный слой тонким. Для анализа проблемы применен метод многих масштабов, который позволил найти и исследовать стационарный вторичный поток внутри турбулентного пограничного слоя. Самоиндуцированный подсос жидкости из внешнего потока является основным течением в этом случае, который обеспечивает подачу кинетической энергии в зону генерации турбулентности. Вторичные стационарные решения найдены аналитически для продольной составляющей скорости. Полученный подход применяется к потоку в канале и к течениям со свободной турбулентностью.

## ОБРАТНОЕ ПРИСТЕНОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ В БЕЗГРАДИЕНТНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

**Д.И. Зарипов, Н.И. Михеев**

*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ "Казанский научный центр РАН", Казань*

zaripov.d.i@mail.ru

Долгое время существование явления обратного пристеночного течения (ОПТ) в турбулентном пограничном слое с нулевым градиентом давления казалось невозможным или даже противоречивым.Со времен их теоретического предсказания [1], было проведено всего несколько исследований, касающихся их пространственно-временнойпротяженности. Однако, пожалуй, главный вопрос о природе их возникновения все еще остается открытым. В настоящей экспериментальной работе мыпоказываем, что эти структуры возникают в результате торможения потока с последующим его ускорением в направлении стенки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00421

## ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХАВ ПОМЕЩЕНИИ ПРИ БОКОВОЙ СТРУЙНОЙ ПОДАЧЕ

**М.А. Засимова, Н.Г. Иванов**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

zasimova_ma@spbstu.ru

Представляются результаты численного моделирования циркуляции воздуха в модельном помещении при подаче вентиляционной струи ($Re = 4.57\times10^4$) из прямоугольного отверстия, расположенного на одной из боковых стенок. Расчеты с использованием пакета ANSYSFluent проводятся на основе метода крупных вихрей с пристенным моделированием. Проведена оценка достоверности результатов численного моделирования:распределения скоростии пульсаций в нескольких сечениях хорошо согласуются с данными эксперимента Hurniketal. (2015). Обсуждаются особенности структуры течения в области струи и в области возвратного течения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-58-18011.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСЖИМАЕМОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА ЦИЛИНДРОМ СО СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

**В. Н. Зиновьев[1], С.А. Исаев[2], В.А. Лебига[1], Д.С. Миронов[1], А. Ю. Пак[1], В.Г. Савицкий[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург*

*lebiga@itam.nsc.ru*

Экспериментально исследована структура несжимаемого течения за круглыми цилиндрамиразличного диаметра и высоты, имеющими как гладкую,так и частично структурированную боковую поверхность. Цилиндр мог вращаться вокруг своей оси посредством шагового двигателя для изменения положения структурированной частибоковой поверхности относительно набегающего потока.Получены профили средней скорости и пульсаций скорости поперек следа за цилиндрами, имеющими как гладкую, так и частично структурированную поверхность. Рассчитаны профили коэффициентов асимметрии и плоскостности для пульсаций скорости как внутри, так и вне следа за исследуемыми цилиндрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ№ 18-58-52005 МНТ_а.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВОДЫ МЕТОДАМИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

**И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротеева, П.А. Рязанов, А.М. Шагиянова.**

*МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва*

koroteeva@physics.msu.ru

В работе на основе анализа нестационарных тепловых полей проведено исследование ламинарно-турбулентного перехода в пристеночной области взаимодействиязатопленной струи жидкости с плоской стенкой. Для регистрации пограничного слоя применялся бесконтактный метод высокоскоростной инфракрасной термографии. Анализ параметров течения проводился на основе расчета

среднеквадратичных значений и энергетических спектров пульсаций, а также векторных полей скорости в пристеночном слое жидкости. Проведена оценка параметровзоны турбулизации течения в пристеночном слое для различных чисел Рейнольдса и расстояний от сопла до поверхности соударения.
Работа выполнена при поддержке грантаРФФИ №16-38-60186.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ

**М.В. Калашник, М.В. Курганский,А.А. Хапаев**
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*
kalashnik-obn@mail.ru

Исследована проблема гидродинамической устойчивости системы вертикальных движений, инициируемых пространственно периодическими распределениями источников тепла. Для описания динамики возмущений использован метод Галеркина. Уравнения конвекции сведены к системе уравнений для коэффициентов разложения возмущений в тригонометрический ряд Фурье. В рамках системы развита линейная и нелинейная теория устойчивости. Определена область неустойчивости на плоскости определяющих параметров (чисел Ричардсона и Рейнольдса). Представлены результаты численного интегрирования системы нелинейных уравнений метода Галеркина.
Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 18-05-00414-а и 18-05-00831-а).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗА ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ

**В.С. Каприлевская[1], В.В. Козлов[1]**
[1]*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск*
valeria.kaprilevskaya@gmail.com

Представлены результаты исследования развития стационарных и вторичных возмущения за двумерным элементом шероховатости. Получены картины визуализации распределения стационарного возмущения скорости пограничного слоя за двумерным элементом шероховатости при наличии уединенного цилиндрического элемента шероховатости. Было обнаружено, что наложение акустического поля 500 Гц приводит к образованию мультипликации продольных структур.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10330.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МАГНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

**Т.О. Карасев, А.С. Теймуразов**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
karasev.t@icmm.ru

Исследуется турбулентная конвекция расплавленного магния в аппарате восстановления титанапри различных конфигурациях нагрева и охлаждения цилиндрической реторты. Задача решалась в трехмерной нестационарной постановке с использованием RANS моделей k-epsilonи k-omegaSST для моделирования турбулентности. Верификация моделей проводилась при помощи сопоставления результатов с данными полученными на подробных сетках с использованием метода крупных вихрей (LES). Получены оценки для градиентов температуры и максимальной скорости движения среды в реакторе.
Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (проект С-26/788).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫМ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

**М.М. Катасонов[1], В.В. Козлов[1], А.М.Павленко [1], И.А. Садовский[1]**
[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*
mikhail@itam.nsc.ru

**Р**абота посвящена экспериментальномуисследованию возникновения и развития волновых пакетов (предвестников) и продольных локализованных структур в дозвуковом пограничном слое. Изучаемые волновые пакеты образуются при резком локальном изменении продольной скорости внутри пограничного слоя, наблюдаемом вблизи фронтов локализованных полосчатых структур. Продольные локализованные структуры генерируются искусственно с помощью локализованного воздействия на пограничный слой при низкой степени турбулентности набегающего потока. Показано, что образование турбулентности происходит за счет пространственного развития волновых пакетов. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10330.

## О КОНВЕКТИВНОЙУСТОЙЧИВОСТИ БИНАРНОЙ СМЕСИ С АНОМАЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ СОРЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ КОЛОННЕ

**С. В.Козлова[1], И. И.Рыжков[1,2], М. М. Боу-Али[3]**
[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*
[3]*Университет Мондрагона, Мондрагон, Испания*
sonique@icm.krasn.ru

В работе представлен теоретический анализ устойчивости разделения бинарной смеси в цилиндрической колонне при аномальном эффекте термодиффузии (Соре). Исследование выполнено совместно с Университетом Мондрагона (Испания), где проводятся экспериментальные наблюдения. Результаты работы описывают явление устойчивого конвективного течения в цилиндрической ко-

лонне при концентрации более тяжелого компонента в ее верхней части, что, согласно экспериментальным данным, имеет место в некотором диапазоне параметров системы.
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки (проект № 18-41-243005).

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПОДКОВООБРАЗНЫМИ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ, ФОРМИРУЮЩИМИСЯ В ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА И ПЛАСТИНЫ: ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ

**Е.В. Колесник**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

kolesnik_ev@mail.ru

Представляются результаты численного моделирования турбулентного течения несжимаемой жидкости и теплообмена в области сочленения затупленного тела и пластины. Проводится сравнение с имеющимися в литературе экспериментальными данным, обсуждаются вопросы сходимости по сетке. Проводится анализ влияния числа Прандтля, меняющегося в диапазоне от 0.7 до 10, на интенсификацию теплообмена обусловленную формированием подковообразных вихревых структур.

## СТРУКТУРА И ПОВЕДЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ

**И.В. Колесниченко, С.Д. Мандрыкин, В.С. Озерных, В.А. Ельтищев, Р.И. Халилов, А.М. Павлинов, Г.Л. Лосев, П.Г. Фрик**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

kiv@icmm.ru

В работе изучается течение жидкого металла в цилиндрической ячейке, вызванное действием электромагнитной силы. По металлу течет электрический ток, который локально подводится к области на дне ячейки и отводится в верхней части. Сила возникает при совместном действии электрического тока и его собственного магнитного поля. Завихренность силы отлична от нуля и возникает электровихревое течение (ЭВТ). Численно и экспериментально исследуются характеристики интенсивности и осцилляции ЭВТ. Разработаны методы бесконтактного определения положения границы жидкого металла. Изучена возможность влияния на интенсивность и форму ЭВТ.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ – Helmholtz – 18-41-06201.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

**В.Ф. Копьев**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Москва*

vkopiev@mktsagi.ru

Исследуются механизмы турбулентности, участвующие в генерации шума турбулентными струями. Рассматриваются три модели генерации шума, связанные с различными представлениями об излучающей турбулентности, – это мелкомасштабная турбулентность, связанная с процессами рождения мелких вихрей, волны неустойчивости, развивающиеся вниз по потоку за счет неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, и крупномасштабные когерентные вихри, излучающие за счет собственных колебаний ядра. Показана важность понимания структуры излучающей турбулентности с точки зрения разработки новых методов управления шумом, а также с точки зрения валидации численных методов, необходимых для решения индустриальных задач.

## ЛАГРАНЖЕВ ФОРМАЛИЗМ В ЗАДАЧАХ О ВОЗМУЩЕНИЯХ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ: ОБОБЩЕНИЕ НА НЕЛИНЕЙНЫЙ СЛУЧАЙ

**В.Ф. Копьев[1], С.А. Чернышев[1]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Москва*

chernyshev01@mail.ru

Для описания нестационарных вихревых течений несжимаемой идеальной жидкости сформулирован новый подход, использующий методы механики Лагранжа с полем смещения в качестве обобщенной координаты. Использование этого подхода для линейных возмущений позволило авторам ранее получитьусловие сохранения квадрупольного момента для возмущений завихренных течений и найти класс течений, удовлетворяющих этим условиям. В этой работе проведено обобщение на нелинейный случай. Рассматривается вопрос о взаимосвязи такого представления с другими известными подходами, использующими координаты жидких частиц в качестве обобщенных координат. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01271.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОМ ПЕРЕХОДЕ В ПЕРИОДИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

**А.Д. Косинов[1,2], Л.В. Афанасьев [1,2],Ю.Г. Ермолаев[1], Г.Л. Колосов[1], В.Л. Кочарин[1], А.В.Панина[1], Н.В. Семенов[1], А.А.Яцких[1,2]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

kosinov@itam.nsc.ru

Представлены результаты измерения полей возмущений и ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях моделей скользящих крыльев с углами скольжения передних кромок 45° и 72° и периодическими шероховатостямина поверхности при числах Маха 2 и 2,5. Определены распределения модулированного среднего течения, пульсаций массового расходаи температуры торможения. Получены диаграммы пульсаций и их статистические характеристики при ламинарно-турбулентном переходе. Показано, что величина отношения возмущений температуры торможения к пульсациям массового расхода (около 0,1) не изменяется в процессе перехода.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01289.

## ЛИНЕЙНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ОПИСЫВАЕМОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛЬЮ ВИНОГРАДОВА-ПОКРОВСКОГО

**Ю.Л. Кузнецова**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

julyas@icmm.ru

Проведено исследование линейной устойчивости стационарного однородного решения системы дифференциальных уравнений описывающих течение Куэтта для полимерной жидкости, определяемой модифицированной моделью Виноградова-Покровского. Показано, что в области параметров модели, обеспечивающих немонотонность кривой течения, линейный профиль скорости становиться неустойчивым при превышении скорости движения пластины критического значения.

## ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЗАВИХРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРЕХМЕРНОМ СЛОЕ

**Ю.М. Куликов[1], Э.Е. Сон[1]**

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

kulikov-yurii@yandex.ru

В работе представлены результаты численногомоделирования процесса смешения в трехмерном плоском слое, периодически продолженном в двух направлениях, третьем направлении он ограничен стенками с различной температурой. Анализ процесса смешения в широком диапазоне среднемассовых чисел Рейнольдса проводится на основе кривых кинетической энергии, а также результатов усреднения в направлениях периодичности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00484.

## О ВИХРЕВОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В УСТОЙЧИВОМ АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

**Л.И. Курбацкая[1], А.Ф. Курбацкий[2]**

[1]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

ludmila_kurbat@mail.ru

Особенности турбулентного вихревого перемешивания в атмосферном пограничном слое изучены с помощью мезомасштабной RANS-модели. Вычисленные характеристики согласуются с данными измерений в лаборатории и атмосфере. Потоковое число Ричардсона в переходный период течения к сильно устойчивому состоянию немонотонно, возрастая с увеличением градиентного числа Ричардсона до состояния насыщения, разделяющего режимы сильного и слабого перемешивания. Анализ энергетики показывает, что и при слабом перемешиваниипроисходит перенос импульса.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0315-2016-0004 и при поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (грант № 18-48-540005).

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ, НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ С ОРОГРАФИЕЙ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

**Л.И. Курбацкая[1], С.Н. Яковенко[2]**

[1]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

yakovenk@itam.nsc.ru

Изучены особенности развития конвекции и турбулентности в среде с устойчивой стратификацией под влиянием городского острова тепла и при обрушении внутренних волн в потоке с орографией. Явление обрушения подветренных

волнисследованопутемDNS и LESв широких диапазонах чисел Рейнольдса, Прандтля/Шмидта, Фруда, для условийв лаборатории, атмосфере, океане и различных параметровгеометрии препятствий, глубины потока, условий на границах. Результаты примененияRANS и LES к задаче городской аэромеханики и структуры турбулентности проникающей конвекции над островом тепла сопоставленыс данными опыта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (грант № 18-48-540005).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА В ПОЛУКОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

**В.А. Лебига[1,2,3], А.Ю. Пак[1], В.Н. Зиновьев[1], Д.С. Миронов[1], Б.Г. Хан[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирскийгосударственный университет, Новосибирск*

[3]*Новосибирскийгосударственный технический университет, Новосибирск*

lebiga@itam.nsc.ru

**Т**ечение Куэтта реализовано в канале между неподвижной полукольцевой стенкой и вращающимся цилиндром. Канал соединен с успокоительной камерой для гашения возмущений, создаваемых датчиками. При малых значениях числа Рейнольдса *Re* поток соответствует плоскому течению Куэтта с линейным профилем скорости. При больших числах *Re*(или Тейлора *Ta*) характеристики течениянаналогичны кольцевому. Получены профили средней скорости и пульсаций, определены размеры вихрей Тейлора. Показано, что величина пульсаций скорости не зависит от способа изменения числа *Re* (или *Ta*) – за счет скорости или плотности.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ18-08-01117 и проекта РАН 0323-2016-0003.

## ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СТРУЯХЧЕРЕЗ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ

**В.В. Леманов[1,2], К.А. Шаров[1]**

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

[2]*НГАСУ, Новосибирск*

lemanov@itp.nsc.ru

Для истечения струй различных газов из длинных круглых трубок впервые экспериментально обнаружен режим перехода к турбулентности через механизм перемежаемости в ближнем поле струи. Он реализуется в диапазоне чисел Рейнольдса 1900-3200 когда внутри источника струи – в трубке происходит ламинарно-турбулентный переход. Причиной перемежаемости являются турбулентные пятна типа порывов (puff). Эти локализованные турбулентные структуры образуются внутри трубы, имеют в струе длину порядка 10-30 диаметров трубы и занимают весь попереченый размер струйного течения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-08-00958.

## СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ПРИ ЛАМИНАРИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ

**В.Г. Лущик, М.С. Макарова, А.И. Решмин**

*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва*

vgl_41@mail.ru

Проведено численное исследование возможности ламинаризации течения в трубе для трех вариантов входных устройств с различными профилями скорости и мелкомасштабной турбулентностью. Наиболее перспективным оказался экспериментально исследованный вариант с организацией двухзонного течения с замедленным потоком в центральной области трубы и ускоренным в пристеночной области. В этом варианте получено число Рейнольдса ламинаризации 16000. Показано, что дальнейшее повышение числа Рейнольдса ламинаризации может быть достигнуто при уменьшении интенсивности и масштаба турбулентности на входе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00115 и Совета по грантам Президента РФ (№СП-3993.2018.1).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВДУВА ТЯЖЕЛОГО ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ И ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД

**В.И. Лысенко**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

vl@itam.nsc.ru

Впервые проведено экспериментальное исследование влияния распределенного вдува в пристеночный слой пограничного слоя тяжелого газа (элегаза$SF_6$) на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход сверхзвукового пограничного слоя при числе Маха набегающего потока $M_\infty$=2. Влияние на устойчивость пограничного слоя исследовалось как по отношению к естественным возмущениям, так и к контролируемым. Впервые экспериментально показано, что вдув тяжелого газа (гексафторида серы) стабилизирует течение в сверхзвуковом пограничном слое, а ламинарно-турбулентный переход отдаляется от передней кромки.

Работа выполнена при поддержке проекта базового государственного задания №0323-2018-0009.

## СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ПОРИСТОСТИПОВЕРХНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ПЕРЕХОДСВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

**В.И. Лысенко, С.А. Гапонов, Б.В. Смородский, Ю.Г. Ермолаев, Н.В. Семенов**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. ХристиановичаСО РАН, Новосибирск*

vl@itam.nsc.ru

Проведены совместные теоретико-экспериментальные исследования по влиянию проницаемости поверхности модели и ее шероховатости на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине при числе Маха набегающего потока M=2. Исследования показали, что для величины шероховатости, превышающей определенное критическое значение, при росте толщины пористого или шероховатого покрытия устойчивость пограничного слоя ослабевает, а положение ламинарно-турбулентного перехода смещается по направлению к передней кромке модели.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00070-а и проекта базового государственного задания №0323-2016-0009.

## ТУРБУЛЕНТНАЯ КОНВЕКЦИЯ НАТРИЯ В ЦИЛИНДРЕ С РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПО ОТНОШЕНИЮ К СИЛЕ ТЯЖЕСТИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**А.Д. Мамыкин, И.В. Колесниченко, Р.И. Халилов, А.М. Павлинов, А.В. Шестаков, П.Г. Фрик, О. Шишкина, Л. Цвирнер**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

mad@icmm.ru

Представлены результаты экспериментального исследования и прямого численного моделирования турбулентной конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре с длиной равной диаметру. Цилиндр расположен под углом $\beta$ к вертикали, $0 \le \beta \le 90^{\circ}$. Число Релея в экспериментах составляет $1.42 \cdot 10^7$, в расчетах – $1.67 \cdot 10^7$. Экспериментальные и численные результаты хорошо согласуются. Показано, что структура течения и интегральные характеристики процесса существенно зависят от $\beta$. При всех $\beta$ как в эксперименте, так и в расчетах в полости формируется крупномасштабная циркуляция (КМЦ), а при$\beta$от 0 до 36° наблюдается слошинг КМЦ и торсионные колебания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00339.

## ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ЖИДКОГО НАТРИЯ В НАКЛОННОМ ЦИЛИНДРЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

**С.Д. Мандрыкин, А.С. Теймуразов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

msd@icmm.ru

Представлены результаты численного исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре с длиной равной диаметру. Нижний торец цилиндра нагревается, а верхний охлаждается. Цилиндр расположен под углом $\beta$ к вертикали, $0 \le \beta \le 90^{\circ}$. Число Релея составляет $1.5 \cdot 10^7$. Задача решается в трехмерной нестационарной постановке с применением метода крупных вихрей. Показано, что при всех $\beta$ в полости формируется крупномасштабная циркуляция (КМЦ), максимальная интенсивность которой наблюдается при наклоне 50º. При этом же наклоне тепловой поток вдоль оси цилиндра максимален и на 29% выше, чем для $\beta$=0º.

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (проект С-26/788).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЯХНА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И ЭЛЕКТРОТУРБУЛЕНТНОЙ АНАЛОГИИ

**С.А. Маслов[1, 2], В.Л. Натяганов[2]**

*[1]Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

*[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

sergm90@mail.ru

Анализируется электротурбулентная аналогия между уравнениями Максвелла и гидродинамики турбулентного течения идеальной несжимаемой среды. Связь между гидродинамическими величинами имеет вид системы уравнений электромагнитного поля и закона Ома, что говорит о возможности переноса турбулентных пульсаций в виде поперечных волн и генерации электромагнитного излучения в атмосферных вихрях при наличии заряженных микрочастиц в турбулентном потоке.На основе уравнений турбулентного движения и методики вейвлет-анализа рассмотрен пульсационный механизм усиления завихренности в торнадо и тайфунах. Вклад пульсаций в генерацию азимутальной скорости может быть сравним с вкладом растяжения вихревых линий.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ СОВРЕМЕННОЙ АКТИВИЗАЦИИ ПЛАНЕТЫ И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

**С.А. Маслов[1, 2], В.Л. Натяганов[2], Ю.Д. Скобенникова[2]**

*[1]Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

*[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

sergm90@mail.ru

Современная активизация планеты (САП) сказывается в росте числа и энергетики опасных явлений природы катастрофического характера (сильных землетрясений и извержений вулканов, мощных тайфунов и серийных торнадо, резких скачков температуры и т.д.) при существенном расширении географии их проявлений. Статистически выявленные признаки САП и ее возможные причины

вызывают острые дискуссии среди геофизиков и климатологов. В докладе акцент делается на небесно-механические причины САП и наблюдаемого тренда изменения климата: угол наклона оси и вариации угловой скорости вращения Земли; главные фазы годового обращения Земли и особые астрономические конфигурации в Солнечной системе.

## МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ИМПУЛЬСНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

**И.А. Мизева, С.А.Денисов, В.И.Носков, А.М.Павлинов, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

mizeva@icmm.ru

Экспериментально и численно исследован импульсный турбулентный поток жидкого натрия в тороидальном канале. Сравниваются характеристики турбулентности, возникающей в свободном канале и в канале с установленными решетками. Экспериментальные измерения характеристик пульсаций скорости в канале и магнитного поля вблизи стенки канала подкреплены оценками характеристик пульсаций магнитного поля в самом потоке, полученными на основе маломодовой каскаднойомодели МГД турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и правительства Пермского края (проекты РФФИ-Урал 17-41-590059и С-26/788)

## ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В НЕРАВНОВЕСНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

**Н.И. Михеев, И.И. Саушин, Н.С.Душин**

*Институт энергетики иперспективных технологий ФИЦКазНЦ РАН, Казань*

n.miheev@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования динамически неравновесного пограничного слоя, формирующегося при стационарном течении в диффузорном канале и при колебаниях потока в канале постоянного сечения. Показано, что в том и другом случае положительный градиент давления приводит к многократному (в 2-5 раз) изменению интенсивности турбулентных пульсаций по толщине пограничного слоя. Относительный градиент давления (параметр Клаузера) не является единственным числом подобия – его одинаковый уровень для двух упомянутых способов формирования этого градиента не обеспечивает подобия профилей турбулентных пульсаций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № № 19-08-00421.

## ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЫСТУПА В КАНАЛЕ РАЗЛИЧНОЙ ШИРИНЫ В СТАЦИОНАРНОМ И ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКАХ

**В.М. Молочников[1,2], А.Б.Мазо [3], А.В.Малюков [1], Е.И.Калинин [3]**

[1]*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева – КАИ, Казань*

[3]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

vmolochnikov@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований и прямого численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода при отрыве потока за поперечным полуцилиндрическим выступом в прямоугольном канале в стационарном и пульсирующем внешнем потоке. Выполнена оценка влияния ширины канала и степени его загромождения выступом на закономерности ЛТП. Анализируется роль спиралевидного движения жидкости от боковых стенок канала к его плоскости симметрии в формировании вихревых структур на поздних стадиях перехода. Получена информация о закономерностях воздействия вынужденных пульсаций потока на исследуемое течение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ№. РФФИ 18-48-160030

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОМЕНТОВ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПОТОКА И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

**В.М. Молочников[1,2], А.Н.Михеев[1], Н.И.Михеев[1], И.И. Саушин [1]**

[1]*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева – КАИ, Казань*

vmolochnikov@mail.ru

Выполнены экспериментальные исследования структуры течения и характеристик турбулентности в ближнем следе цилиндра при Re = 3900. Эксперименты проводились при помощи метода SIV, обладающего беспрецендентно высоким пространственным и временным разрешением. Проведен сравнительный анализ результатов SIV измерений с известными экспериментальными данными и результатами прямого численного моделирования.Выявлены основные закономерности эволюции профилей скорости в следе. Выполнена оценка моментов третьего порядка пульсаций скорости потока и членов генерации и диссипации турбулентной кинетической энергии в ближнем следе цилиндра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-160022.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАССИВНОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА КОНУСЕ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ АТАКИ И ЗАТУПЛЕНИЯ НОСОВОЙ ЧАСТИ

**С.О. Морозов[1,2], С.В. Лукашевич[1], А.Н. Шиплюк [1,3]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механикиим. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

morozov@itam.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование влияния углов атаки и затупления носика конуса на эффективность стабилизации гиперзвукового пограничного слоя при помощи пористого покрытия. Измерения проведены на конусе при числе Маха M = 5,8. Показано, что небольшое изменение угла атаки или радиуса затупления носика конуса приводит к значительному изменению устойчивости и положения перехода пограничного слоя. Пористое покрытие эффективно подавляет наиболее неустойчивые возмущения и задерживает переход пограничного слоя на наветренной и подветренной сторонах конуса с различным радиусами затупления носика.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00794.

## ВЛИЯНИЕ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА ХЕМОКОНВЕКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРИ РЕАКЦИИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

**Е.А. Мошева, Н.В. Козлов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

mosheva@icmm.ru

Экспериментально исследуется влияние высокочастотных вертикальных вибраций на динамику реакции A+B→C, протекающей в конвективном режиме (КР) в двухслойной системе смешивающихся жидкостей в вертикальной ячейке Хеле-Шоу. В поле силы тяжести протекание реакции сопровождается формированием волны плотности и интенсивной конвекции Рэлеевского типа. Показано, что в изученной области параметров перегрузки, создаваемые вибрационным воздействием, не оказывают заметного влияния на структуру возникающего конвективного течения и динамику реакции. Предложена возможность повышения вибрационного эффекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00308 мол_а. Авторы также благодарят Программу поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

**Ю. М. Нечепуренко[1,2], А.В. Бойко[3,4],К.В. Демьянко[1,2],Г.В. Засько[1,2]**

[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, Москва*

[2]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[3]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СОРАН, Новосибирск*

[4]*Тюменский государственный университет, Тюмень*

yumnech@yandex.ru

Обсуждается разработанная авторами доклада оригинальная технология численного анализа временной и пространственной устойчивости гидродинамических течений. Использование технологии иллюстрируется на примерах течения Пуазейля в оребренных каналах, локальной генерации и развития вихрей Гертлера в пограничном слое над вогнутой поверхностью, возникновения крупномасштабных структур на фоне мелкомасштабной турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-20149.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ В ПЕРЕХОДНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

**Т.Т. Нгуен, Д.С. Сбоев**

*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

t124@inbox.ru

Представлены результаты экспериментов по проверке недавно предложенной М.В. Устиновым статистической модели ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое при повышенной степени турбулентности внешнего потока. Оказалось, что не все допущения этой теории имеют место на практике. Однако важнейшее положение о начале генерации турбулентных пятен при достижении полосчатыми структурами некоторой пороговой амплитуды подтвердилось во всех опытах. Полученные результаты свидетельствуют, что исследовавшаяся модель при ее дальнейшем развитии может быть положена в основу нового метода предсказания перехода в таких условиях.

## НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРИРОДУ ОРГАНИЗОВАННЫХ СТРУКТУР В ПРИСТЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

**Н.В. Никитин[1], В.О. Пиманов[1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

nvnikitin@mail. ru

Численно исследованы решения Уравнений Навье-Стокса, моделирующие турбулентные течения в трубах круглого и квадратного поперечного сечений. Проведен анализ условий и причин возникновения продольных вихрей, вызывающих характерную попереч-

ную модуляцию продольной скорости.Показано, что само наличие продольных вихрей так деформирует пульсационное поле, что нелинейное взаимодействие пульсаций обеспечивает обратную связь, поддерживающую их существование.
Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносовапри поддержке гранта РНФ № 18-71-10075.

## ТЕНЕВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА МЕЖДУ НЕОДНОРОДНЫМ ВИХРЕВЫМ КОЛЬЦОМ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

**В.В. Никулин**[1]

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

nikulin@hydro.nsc.ru

Теневым методом выполнена регистрация вихревого кольца, плотность жидкости в котором на начальном этапе движениябольше, чемвне его. Оказалось, что изображение вихря сначала темнеет, достигает максимума потемнения, затем светлеет. Данное явление связано с турбулентным обменом между вихрем и окружающей жидкостью. В связи с этим, время, проходимое вихрем до места, где потемнение достигает максимума, принято за характерное время турбулентного обмена. На основе измерений характерного времени дана оценка коэффициента турбулентной диффузии в атмосфере вихревого кольца в зависимости от его параметров.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00824.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АППАРАТА HEXAFLY-INT

**А.О. Образ**[1]**, С.В. Александров**[1]**, А.В. Федоров**[2]

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт, Жуковский*

obraz.ao@mipt.ru

Произведен анализ устойчивости ламинарного пограничного слоя на нижней поверхности аппарата Hexafly-INT под углами атакидля двух режимов течения, соответствующих эксперименту в аэродинамической трубе и траекторной точке при крейсерском полете в атмосфере. Расчеты усиления неустойчивых мод пограничного слоя выполнены в рамках линейной теории устойчивости и e-Nметода. Увеличение угла атаки приводит к существенной дестабилизации пограничного слояв областях с развитым поперечным течением. Показано, что в данных областях может происходить ламинарно-турбулентный переход в кормовой части аппарата.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-38-20091

## УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ ЭЙЛЕРА 1752 г. С ЧЛЕНАМИ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА МАЛОСТИ, ДАЮЩИМИ ГЕНЕРАЦИЮ ВОЛН И АВТОКОЛЕБАНИЙ

**В.М. Овсянников**[1,2]

[1]*Московская государственная академия водного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»*

[2]*Ноябрьский институт нефти и газа - филиал Тюменского индустриального университета.*

OvsyannikovVM@yandex.ru

В 1752 г. Эйлер, деформируя контрольную фигуру деформациями растяжения, сжатия, сдвига, и приравнивая начальный и полученный деформацией объемы, получил уравнение неразрывности, содержащее члены высокого порядка малости. Такие же члены второго порядка малости возникают в построениях теоремы Гаусса-Остроградского, если заменить интегралы интегральными суммами, не пренебрегать касательными компонентами скорости и учесть для некоторых частиц жидкости возможность двойного пересечения границы выпуклой контрольной фигуры по секущей за конечный интервал времени. Члены второго порядка малости из уравнения неразрывности проникают в волновое уравнение и приводят к генерации звука и автоколебаний.

## ВИБРАТОР ЛАНДАУ-ЛИФШИЦА, СОЗДАЮЩИЙ КОЛЕБАНИЯ В СОСУДАХ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

**В.М. Овсянников**[1,2]

[1]*Московская государственная академия водного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»*

[2]*Ноябрьский институт нефти и газа - филиал Тюменского индустриального университета.*

OvsyannikovVM@yandex.ru

Биофизика использует идею проникновения механики в объяснение явлений, происходящих в живых организмах. Ландау и Лифшиц вывели неоднородное волновое уравнение, позволяющее вычислить самопроизвольное возникновение колебательных явлений в движущихся газах и жидкостях. Применение решений волнового уравнения позволит часть колебательных движений, рассматриваемых как проявление жизни, объяснить и вычислить на основе уравнений гидрогазодинамики. В живых организмах выработались тонкие и совершенные механизмы процессов обмена, часть из которых может быть интенсифицирована периодическими колебаниями. Даже слабые колебания во внутренних течениях, происходящих внутри живого организма, могут со временем накапливать колебательную энергию, обеспечивающую ускорение процессов обмена веществ.

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ДИФФУЗИОННЫЕ МОДЕЛИ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**В.А. Орлов, Л.Д. Терехина**

*Ульяновский государственный университет, Ульяновск*

terehina_ld@mail.ru

В рамках алгебраического спектрального метода построены семейства моделей однородной и изотропной турбулентности, удовлетворяющие различным, в том числе ранее не рассматриваемым условиям. Проведен сравнительный анализ, намечены направления развития данного метода в целях решения проблемы замыкания уравнения спектрального баланса турбулентной энергии.

## ОБТЕКАНИЕ ПРЯМЫХ И СТРЕЛОВИДНЫХ КРЫЛЬЕВ ПРИ ПОПАДАНИИ В ТУРБУЛЕНТНЫЙ СЛЕД

**А.М. Павленко[1], Б.Ю. Занин[1], А.В. Быков[1]**

*[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение наукиИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. ХристиановичаСибирского отделения Российской академиинаук, Новосибирск*

pavlyenko@gmail.com

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния турбулентного следа на обтекание моделей прямого крыла и БПЛА при различных углах атаки и скольжения. Были получены картины визуализации структур течения. Было обнаружено, что турбулентный след может приводить к уменьшению области отрыва.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-00189.

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ И ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ЗА ТРЕХМЕРНЫМ И ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕМЕНТАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКЕ МОДЕЛИ ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА

**А.М. Павленко[1], В.С. Каприлевская[1], М.М. Катасонов[1]**

*[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение наукиИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. ХристиановичаСибирского отделения Российской академиинаук, Новосибирск*

pavlyenko@gmail.com

Представлены результаты исследования влияния элементов шероховатости на течение на модели летающего крыла. Была определена область максимальной восприимчивости для данной модели крыла. Также были получены картины визуализации структуры течения за трехмерным элементом. Было обнаружено, что наложение акустического поля 1кГц приводит к увеличению амплитуды стационарных структур за двумерным элементом шероховатости.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-00189.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ С ВОЛНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ЧИСЛЕ МАХА 2 И 2,5

**А.В. Панина[1], А.Д. Косинов[1,2], Н.В. Семенов[1], Ю.Г. Ермолаев[1]**

*[1]Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск*

*[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

avpanina@itam.nsc.ru

В работе рассмотрены результаты экспериментального исследования развития естественных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины с волнистой поверхностью. В работе использовалась модель плоской пластины с притупленной передней кромкой. Для создания волнистой поверхности на модель нанесены продольные элементы шероховатости, дополнительно покрытые пленкой для сглаживания/выравнивания боковых срезов шероховатостей и придания им скругленной формы.Для данных условий эксперимента не обнаружено влияния волнистости поверхности на положение ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое плоской пластины.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17 19-01289.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРАНДТЛЯ ВТОРОГО РОДА ВДОЛЬ ВНЕШНЕГО УГЛА

**Д.Е. Пивоваров[1], Н.В. Никитин [1], Б.И. Краснопольский [1]**

*[1]Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

pivovarov@imec.msu.ru

В работе приведены результаты моделирования турбулентных течений на основе численного решения уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Исследуются вторичные течения, возникающие вдоль внешнего угла, помещенного в трубу различного сечения. Рассчитаны средние и пульсационные характеристики течения, нормальные и сдвиговые напряжения Рейнольдса, скорости распространения возмущений продольных компонент скорости и завихренности, расположение критического слоя. Оценен вклад различных слагаемых, входящих в источниковый член продольной компоненты завихренности.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (гранты №17-01-00140 и №19-05-00028).

## О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРАНДТЛЯ 2-ГО РОДА В ТРУБАХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

**Н. В. Попеленская[1], Н.В. Никитин[1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

aero.natap@mail.ru

Численно исследовано турбулентное течение в прямой трубе квадратного поперечного сечения. Изучены концентрированные продольные вихри, ответственные за возникновение вторичных течений. Показано, что продольные вихри образуются под действием турбулентных пульсаций, в которых пульсации продольной компоненты завихренности специальным образом согласованы по фазе с пульсациями продольной компоненты скорости. Даны объяснение и физическая интерпретация вскрытого механизма.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00140.

## УСТОЙЧИВОСТЬ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ТРЕХХОДОВЫМ РАСШИРЕНИЕМ

**А.В. Проскурин[1], А.М. Сагалаков[2]**

[1]*Алтайский государственный технический университет, Барнаул*

[2]*Алтайский государственный университет, Барнаул*

k210@list.ru

В работе рассмотрено магнитогидродинамическое течение в канале, который расширяется с образованием трех потоков. Рассмотренная конфигурация моделирует коллектор бланкета токамака. Сильное магнитное поле, которое удерживает плазму в реакторе, оказывает большое влияние на течение жидкого металла через бланкет. Для описания движения жидкости используются уравнения магнитной гидродинамики в приближении электрического потенциала. Вычисления производятся с помощью спектрально-элементного метода. Изучены стационарные режимы течения и их устойчивость при разных значениях физических и геометрических параметров.

## ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР И АНОМАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В КВАЗИДВУМЕРНОЙ ЗОНАЛЬНОЙ СТРУЕ

**В.П. Реутов[1], Г.В. Рыбушкина[1]**

[1]*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

reutov@appl.sci-nnov.ru

Исследуется возникновение аномального переноса пассивной примеси при возбуждении цепочек волновых структур с замкнутыми линиями тока в квазидвумерномструйном течении, моделирующем крупномасштабные зональные течения в атмосфере и океане Земли и в лабораторных экспериментах. Уравнения квазидвумерного течения решаются численно для струи с "двугорбым" профилем скорости. Обнаружены мультигармонический и хаотический режимы генерации цепочек структур, для которых найдены показатели степенной зависимости от времени для среднего значения и дисперсии смещения частиц примеси. На этой основе установлено наличие аномальной адвекции и диффузии пассивной примеси.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00747.

## СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ТРОЙНОЙ СМЕСЬЮ

**Е.С. Садилов[1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

sadilove@icmm.ru

Работа посвящена изучению слабонелинейных режимов конвекции тройной смеси в горизонтальном слое с границами низкой теплопроводности. При этом учитывается эффект термодиффузии, а также зависимость динамической вязкости и концентраций компонент смеси от температуры. Показано, что в случае монотонных возмущений для положительных значений некоторых параметров устойчивыми могут быть только либо квадратные, либо гексагональные ячейки. Гексагональные ячейки возбуждаются всегда жёстко, а квадратные ячейки – мягко. Гексагональные ячейки устойчивы всегда, а квадратные только для достаточно большой надкритичности. Для малых чисел Прандтля обнаружено существование фазового хаоса.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-21-00090.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА СКОЛЬЗЯЩИХ КРЫЛЬЯХ ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ПОТОКА

**Н.В. Семенов[1], . Ю.Г. Ермолаев[1],А.Д. Косинов[1, 2], А.Н. Семенов[1,3],В.Л. Кочарин[1], С.А. Шипуль[1, 2], Б.В. Смородский[1], А.А. Яцких[1, 2].**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3] *Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск*

semion@itam.nsc.ru

В работе приводятся результаты экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое на скользящих крыльях. Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе с низким носом Т-325 ИТПМ СО РАН при числах Маха М = 2 - 4. Основная модель представляет собой симметричное крыло с углом сколь-

жения 45° и 3% чечевицеобразным профилем. Измерения проводились при помощи термоанемометра постоянного сопротивления. Приводятся данные по влиянию параметров потока, таких как число Маха, единичное число Рейнольдса, угол атаки, уровень возмущений и угол скольжения на развитие возмущений и положение ламинарно-турбулентного перехода.
Работа выполнена при частичной поддержке грантов РНФ № 17-19-01289 (расчеты по линейной теории устойчивости) и РФФИ№19-08-00772 на оборудовании ЦКП «Механика».

## ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА

**Р.А. Степанов, В.Г. Баталов, С.Н. Сухановский**

*Институт механики сплошны средУрО РАН, Пермский федеральный исследовательский центр, Перьм*

rodion@icmm.ru

В работе рассматриваются прикладные методы исследования структуры воздушно-капельного потока. Для факела распыла топливной форсунки проведены измерения размеров капель жидкости методами: Interferometric Particle Imaging и Glare Point Technique. Совместное применение двух методов расширяет диапазон измерений. В результате применения вейвлет-анализа было показано, что IPI-образы могут иметь сильно неоднородную структуру и, как следствие, возрастание ошибки определения размера капли. Предложенный алгоритм оценки ошибки, позволяет ввести дополнительный критерий отбора и получить статистически надежные результаты.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00574.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ В ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА DUALPIV

**Р.А. Степанов, А.Ю. Васильев, С.Н. Сухановский**

*Институт механики сплошны средУрО РАН, Пермский федеральный исследовательский центр, Пермь*

rodion@icmm.ru

Важная роль гидродинамической спиральноститеоретически предсказывается для процессов генерации крупномасштабных магнитных полей и атмосферных вихрей. Численное моделирование дает возможность получить спиральные эффекты в модельных условиях. Однако их лабораторная проверка остается сложной задачей экспериментальной механики жидкости. В данной работе предлагается избежать измерений трехмерных векторных полей, а использовать более эффективный метод вычисления спиральности, основанный на проведении 2D PIV измерений в двух близких параллельных плоскостях. Получены пространственные и спектральные распределения средней и флуктуирующей компоненты спиральностина сетках до 250*250 точек и выборке 2000 реализаций.
Работа выполнена при РНФ (грант 16-41-02012).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ СТРУЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

**С.В. Стрижак[1], А.К. Шевченко[2], С.Н. Яковенко[2]**

[1]*Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва*

[2]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

yakovenk@itam.nsc.ru

Затопленная струя при различных числах РейнольдсаRe, основанных на размере отверстия и средней скорости на входе,исследована с помощью уравнений Навье–Стокса. Изучено влияние Re на характер течения и положение перехода к турбулентности, при задании случайных игармонических возмущений.Сделаны оценки длины и частоты волны колебаний синусоидальной неустойчивости, самовозбуждаемойв струе. Проведено с помощью методов URANS и VOF моделирование струи газа со дна моря, оценено ее действие на вводимое тело.Работа частично поддержана РФФИ (грант № 17-01-00332).

## ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД НА ОСТРОНАСТРОЕННОМ ТРАНСЗВУКОВОМ ПРОФИЛЕ КРЫЛА

**В.Г. Судаков[1], Г.Г. Гаджимагомедов [1], С.А. Глазков [1], А.Р. Горбушин [1], В.Е. Мошаров [1], Д.С. Сбоев [1], А.В. Семенов [1]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский*

vit_soudakov@tsagi.ru

Проведено численное и экспериментальное исследование аэродинамических характеристик остронастроенного сверхкритического трансзвукового профиля крыла самолета. Такие профили в перспективе лягут в основу адаптивных крыльев самолетов следующих поколений. Расчеты выполнены в рамках уравнений Рейнольдса, а эксперименты проведены в большой аэродинамической трубе Т-128 с размером рабочей части 2.75 м. Исследованы характеристики ламинарно-турбулентного перехода при высоких числах Рейнольдса с помощью жидких кристаллов, тепловизора, датчиков пульсаций давления и термоанемометрических измерений. Также изучено начало возникновения автоколебаний скачка уплотнения (бафтинга) на таком профиле.

## ОСОБЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ

**А.Н. Сухановский, Е.Н. Попова**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

san@icmm.ru

Локализованный нагрев во вращающемся слое жидкости приводит к образованию интенсивного циклонического вихря. Показано качественное подобие лабораторного вихря и тропических циклонов. Обнаружено, что циклонический вихрьтеряет устойчивость при низких значениях вязкости и быстром вращении экспериментальной модели. Потеря устойчивости тесно связана со структурой радиального течения. Превышение критического значения вращательного числа Рейнольдса приводит к существенной анизотропии в структуре радиальноготечения, что влияет на устойчивость вихря. Обсуждается возможность контролируемого воздействия на вихрь при помощи обработки изображений в режиме реального времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-45-590846. Обработка изображений в режиме реального времени производилась при помощи вычислительного кластера «Тритон» ИМСС УрО РАН (Пермь).

## ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СО СПЕКТРАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ СПИРАЛЬНОСТИ

**А.С. Теймуразов, Р.А. Степанов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

tas@icmm.ru

Рассмотрены особенности спектрального распределения и спектральных потоков энергии в однородной изотропной спиральной турбулентности.Предложена модель внешней турбулентной силы, позволяющая точно контролировать подкачку энергии и спиральности и достичь высокой относительной спиральности. Показано, что при подкачке спиральности во всем инерционном интервале, наблюдается прямой каскад энергии с законом «–7/3». Обнаружено, что при подкачке спиральности в более крупные масштабы, чем масштабы, в которых осуществляется подкачка энергии, возникает обратный каскад энергии с законом «–5/3».

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (проект С-26/788).

## РАСЧЕТТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ДИФФУЗОРЕ С МАЛЫМИ УГЛАМИ РАСКРЫТИЯ

**В.В. Трифонов, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

trifonovvl@mail.ru

В работе исследовалось явление ламинарно-турбулентного перехода в диффузоре в зависимости от угла раскрытия и степени расширения канала (отношения выходного диаметра диффузора квходному). Расчеты были проведены с использованием трехпараметрической модели сдвиговой турбулентности. На вход в канал подавалось, либо развитое турбулентное течение, либо течение с равномерным профилем скорости и с разной степенью турбулентности. Получены зависимости критического числа Рейнольдса от угла раскрытия для диффузоров с разной степенью расширения:1.65, 2.5, 3.4, 6.8. Такие диффузоры могут быть использованы в теплообменниках нового типа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00115.

## СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЙНОЛЬДСА В ЗАДАЧАХ С ОТРЫВОМ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

**А.И. Трошин**

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

ai-troshin@yandex.ru

Три современных дифференциальных модели для напряжений Рейнольдса – SSG/LRR-ω, RSM-PSASc масштабом длины фон Кармана и TCLc квадратичной моделью обменного члена – применены к расчету двух классических отрывных течений. Первое – взаимодействие скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем на пластине. Второе – обтекание клина сжатия сверхзвуковым потоком. Проведено сравнение с экспериментом размеров отрывных зон, распределений давления и трения на поверхности. Изучена возможность получения колебательных решений для отрывных зон на базе нестационарной системы уравнений Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-08-01436 А.

## ДВА СЦЕНАРИЯ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ОБТЕКАНИИ ПЛАСТИНЫ

**Р.Я. Тугазаков**

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

renatsan@yandex.ru

Показано, что при сверхзвуковом обтекании плоской пластины в зависимости от интенсивности внешних возмущений реализуются два сценария турбулизации потока. При интенсивности внешних волн порядка 1-2 процента от скорости набегающего потока от-

сутствует фаза линейной неустойчивости, а из-за нелинейной неустойчивости образуется пакет почти двумерных интенсивных волн, в результате распада которого образуется система когерентных вихрей. При слабой интенсивности внешних волн, из-за линейной неустойчивости, происходит усиление до интенсивных волн, которые приводят к турбулентному течению с внутренними масштабами задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 17-01-00129 а).

## ЛАМИНАРИЗАЦИЯ ОБТЕКАНИЯ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

**М.В. Устинов[1], А.В. Иванов[2], Д.А. Мищенко[2], Д.А. Русьянов[1]**

[1]*Центральный Аэрогидродинамический институт им. проф. Жуковского, Жуковский*

[2]*Институт теоретическойи прикладной механики СО РАН, Новосибирск*

ustinov@tsagi.ru

Предложен новый пассивный метод управления ламинарно-турубулентным переходом на стреловидном крыле с помощью рельефа поверхности в виде наклонных к направлению местной скорости над пограничным слоем неровностей. Такой рельеф уменьшает скорость поперечного течения в пограничном слое, что приводит к сдвигу точки перехода вниз по потоку. Найден оптимальный угол наклона неровностей и рациональная их форма, обеспечивающие максимальное затягивание перехода. Эффективность ламинаризации обтекания стреловидного крыла с помощью рельефа поверхности продемонстрирована в эксперименте.

## ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

**П.Г. Фрик[1], В.А. Ельтищев[1], Г.Л.Лосев[1], С.Д.Мандрыкин[1], И.В.Колесниченко[1], Р.И.Халилов[1], Ф. Стефани[2], Н. Вебер[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия*

[2]*Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany*

frick@icmm.ru

Жидкометаллические батареи (ЖМБ) состоят из двух жидких металлических электродов, разделенных слоем жидкости с ионной проводимостью (расплавленной соли). Их основными преимуществами являются быстрая кинетика переноса заряда на границах жидкость-жидкость, потенциально низкая стоимость, а также, отсутствие проблем старения, что обещает беспрецедентный срок службы. Однако выходу на промышленно интересные размеры мешает целый букет возникающих неустойчивостей: конвективная, электровихревая, тейлеровская и пр. В докладе представлены результаты исследования электровихревых течений, возникающих в жидкометаллических слоях с различным подводом тока в конфигурациях, интересных для ЖМБ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ – Helmholtz – 18-41-06201.

## ПРОВОДЯЩАЯ ЖИДКОСТЬ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Р.И. Халилов[1], И.В. Колесниченко[1,2], А.М. Павлинов[1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь*

khalilov@icmm.ru

В работе рассматриваются два устройства, основанных на взаимодействии внешних магнитных полей и электропроводящей жидкости – жидкого металла.Исследуется течение проводящей жидкости в цилиндрическом канале под воздействием внешнего переменного магнитного поля. Бегущее магнитное поле приводит к появлению электромагнитной силы, вызывающей течение электропроводной жидкости.Среднее течение электропроводной среды в канале при наложении внешнего постоянного магнитного поля генерирует ЭДС, по которой можно судить о величине средней скорости. Именно этот принцип используется в рассматриваемом в работе кондукционном расходомере.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-48-590539_р_а.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ СМЕСИ МЕТАНА И ВОЗДУХА

**С.А. Чепрасов**

*Центральный институт авиационного моторостроения, Москва*

cheprasov@ciam.ru

В данной работе предлагается методика моделирования турбулентного горения, основанная на LES совместно с одношаговой реакцией окисления метана и квази - ламинарном подходе к описанию взаимодействия турбулентности и горения. Продемонстрировано, что, предложенная методика позволяет получить удовлетворительную точность описания статистических характеристик пульсаций температуры в лабораторной камере сгорания. Анализ констант модели химических реакций, показал, что уменьшение степени при концентрации метана, позволяет эмитировать высоко Рейнольдсовые особенности структуры фронта пламени.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-08-01045.

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРА, ОБТЕКАЕМОГО ПОТОКОМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**М.А. Юдин[1], А.Г. Петров [2]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, Москва*

[2]*Институт проблем механики РАН, Москва*

mikleudin@ya.ru

В работе исследуется неустойчивость цилиндра в циркуляционном потоке вязкой несжимаемой жидкости. Область течения ограниченна внешним жестко закрепленным цилиндром. В положении равновесия цилиндры расположены коаксиально. При отклонении внутреннего цилиндра от коаксиального расположения возникает сила, действующая со стороны жидкости на цилиндр. В настоящей работе исследуется точное решение вязкой задачи при больших числах Рейнольдса. Условие устойчивости в вязкой жидкости сравнивается с условием в невязкой жидкости, а также с оценками, полученными ранее Капицей П.Л.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00373.

## НАЧАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ПОТОКЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ЗАВИХРЕННОСТЬЮ

**М.А. Юдин[1], В.Ф. Копьев[1], С.А. Чернышев [1]**

*Центральный аэрогидродинамический институт, Москва*

mikleudin@ya.ru

Настоящая работа посвящена исследованию устойчивости цилиндра в циркуляционном потоке невязкой несжимаемой жидкости. Основной задачей является исследование сдвиговой неустойчивости, которая, возможно, является одной из причин турбулизации трехмерных вихревых течений. Исследование устойчивости в простой двумерной системе представляет значительный интерес, так как в этой задаче можно получить аналитическое решение и рассмотреть особенности данного типа неустойчивости, связанные с зарождением и развитием возмущений. Для сдвиговой неустойчивости особый интерес представляет исследование области критического слоя, в которой фазовая скорость возмущений совпадает со скоростью среднего течения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01271.

## СМЕШАННЫЕ КОРЕЛЯТОРЫ СКОРОСТИ И ГРАДИЕНТОВ СКОРОСТИ В ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

**А.В. Копьев[1], К.П. Зыбин[1,2]**

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

[2]*НИУ «Высшая школа экономики», Москва*

kopyev@lpi.ru

На основании колмогоровского закона «четырех пятых» получены аналитические соотношения для тройных двухточечных корреляций градиентов скорости и скорости в изотропной несжимаемой турбулентности. Соответствующий тензор корреляции выражен через скорость диссипации ε, корреляционную функцию скорости второго порядка и новые скалярные функции. Некоторые его компоненты не зависят от новых функций. Результаты согласуются с данными прямого численного расчета. Одна из функций аппроксимируется в инерционном интервалеконстантой, зависящей только отε. Обсуждается значение полученных корреляторов в теории турбулентного транспорта.

Исследование выполнено в ЦАГИ за счет гранта РНФ№17-11-01271.

## Подсекция II-4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

### ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ДИНАМИКУ ДВИЖЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ ПУЗЫРЬКОВ

**В.А. Архипов, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина**

*Томский государственный университет, Томск*

usaninaanna@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса всплытия совокупности монодисперсных пузырьков воздуха в жидкости, содержащей поверхностно-активное вещество, в области числа Рейнольдса $Re=10^{-3}\div1$. Для исследования влияния поверхностно-активного вещества в жидкости на характеристики движения совокупности пузырьков разработана экспериментальная установка. Исследовано влияние размера пузырька, концентрации группы пузырьков и концентрации поверхностно-активного вещества в жидкости на динамику всплытия группы пузырьков. Получена эмпирическая зависимость для коэффициента сопротивления совокупности пузырьков, всплывающих в присутствии поверхностно-активного вещества.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10014).

### О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДЕЙТРОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

**Д.Д. Афоничев**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

afon@imsp.ru

Взаимодействие дейтронов в металлической матрице приводит к образованию трития. Нами предложен механизм такого взаимодействия, основанный на резонансном переносе нейтрона от одного дейтрона к другому с образованием протона и тритона. Такие реакции могут протекать только на длинномерных дефектах кристаллического строения, поскольку в идеальной металлической решетке два дейтрона не могут друг другу приблизиться. Находясь в длинномерном дефекте кристаллического строения дейтроны могут образовать пары $D_2^+$, при ускоренном движении такого квазиона в поле кристаллической решетки может произойти резонансный перенос нейтрона.

### РАСЧЕТ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ

**Ф.Г.Ахмадиев[1], Р.М. Гильфанов[1], М.И. Фарахов[2], А.А. Ахмитшин[2]**

[1]*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань*

[2]*ООО Инженерно-внедренческий центр «Инжехим», Казань*

Akhmadiev@kgasu.ru

Построена математическая модель для расчета термогидродинамической обстановки при пленочной конденсации на основе уравнений сохранения массы, импульса и энергии для хладагента в ограниченной области, стекающей пленки конденсата и газовой фазы в двумерной постановке. Учитывается зависимость вязкости рабочих сред от температуры. Граничные условия сопряжения записаны на внутренней стенке области течения хладагента, внешней стенке, по которой течет пленка конденсата, а также на границе раздела пленка-газ. Полученная краевая задача решена приближенными и численными методами совместно с условием для определения неизвестной толщины пленки, что позволяет рассчитать все характеристики процесса конденсации.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ ГТД

**Д.И. Бабушенко, В.И. Копченов**

*Центральный Институт Авиационного Моторостроения, Москва*

vikopchenov@ciam.ru

В данной работе проводится численное моделирование кольцевой камеры сгорания с непрерывно-вращающейся детонационной волной в рамках двух математических моделей – «изолированной» камеры с подачей топливно-воздушной смеси через гипотетическую систему «микро-сопел» Лаваля и «проточной» камеры с воспроизведением течения в кольцевом тракте коллектор-камера. Показано, что для одинаковых условий повышение полного давления в «изолированной» камере выше, чем в «проточной». Полученные данные также анализируются с точки зрения функционирования данной камеры сгорания в составе ГТД.Для описания горения пропана в воздухе используются квазиглобальный и редуцированный реакционные механизмы.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ ИНЕРТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

**И.А. Бедарев**

*Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

bedarev@itam.nsc.ru

Проведено моделирование взаимодействия ячеистой волны детонации, распространяющейся по водородно-воздушной смеси, с облаком микрочастиц оксида алюминия. Газовая динамика моделировалась системой уравнений Навье-Стокса, описывающей движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа с учетом многокомпонентности газовой смеси и химической кинетики. Разработана методика расчета ячеистой детонации в ANSYS Fluent с использованием приведенной кинетики. Исследовано взаимодействие

с инертными частицами диаметром 0.3÷100 мкм и объемной концентрацией$10^{-4}$÷$10^{-2}$. Получены значения объемной доли, приводящие к изменению размера детонационной ячейки, ослаблению детонационной волны и подавлению детонации.
Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-08-00634 и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610139-4).

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ Н-ДЕКАНА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ ПОСРЕДСТВОМ ДОБАВОК НАНОАЛЮМИНИЯ, ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА ИЛИ ВОДОРОДА. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

**Л.В. Безгин, В.И. Копчёнов, А.М. Савельев, Н.С. Титова**
*Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*
kop@ciam.ru

Выполнен сравнительный анализ воспламенения и горения н-декана с добавками наноалюминия, перекиси водорода или водорода в сверхзвуковом воздушном потоке в плоском канале. Расчетытечения выполнены посредством решения стационарных параболизованных уравнений Навье-Стоксас использованием редуцированного кинетического механизма окисления н-декана в воздухе, дополненного кинетикой окисления алюминия, разработанные в ЦИАМ. Продемонстрирована значительная интенсификация воспламенения и горения рассмотренных смесевых топлив по сравнению с чистым н-деканом, при этом наибольшая эффективность у добавок наноалюминия, а наименьшая – у водорода (при равной массовой доле).
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-01098-офи-м, № 17-08-01423-а.
3

## НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Е.И. Борзенко, О.Ю. Фролов, Г.Р. Шрагер**
*Томский государственный университет, Томск*
borzenko@ftf.tsu.ru

Исследуется неизотермическое течение вязкопластичной жидкостис учетом вязкой диссипации, зависимости реологических параметров от температуры, реализуемое при заполнении вертикального плоского канала. Численное решение задачи основано на методе контрольного объема и методе инвариантов для реализации граничных условий на свободной поверхности. Для осуществления сквозного расчета потока проводится регуляризация реологического закона. Выполнены параметрические исследования характеристик потока и поведения свободной границы в зависимости от основных параметров задачи. Выявлены различные режимы течения, характеризующиеся образованием квазитвердых ядер и застойных зон в потоке.
Исследование выполненоза счет гранта РНФ (проект № 18-19-00021).

## О НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ПОРИСТЫЕ ОБЪЕКТЫ С ОЧАГАМИ ГОРЕНИЯ

**К.Г. Боровик[1,2]**
[1]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*
[2]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*
ksushareno@mail.ru

Исследуются течения газа в поле силы тяжести через пористые объекты с очагами гетерогенного горения при заданном давлении на границах объекта и саморегуляции расхода проходящего через объект газа. Предложен вычислительный алгоритм для моделирования нестационарного гетерогенного горения пористых объектов при осевой симметрии с учетом одностадийной химический кинетики. Проведено сравнение результатов вычислений с ранее проведенными расчетами плоских течений газа при гетерогенном горении пористых сред, показано совпадение основных закономерностей процесса в этих случаях.
Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы «Дальний Восток» 2018–2020 (проект 18-5-064).

## ХЕМОКОНВЕКЦИЯ В РЕАГИРУЮЩИХ СМЕСЯХ С КОНЦЕНТРАЦИОННО-ЗАВИСИМОЙ ДИФФУЗИЕЙ: СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКА

**Д.А. Брацун[1], К.Г. Костарев[2], А.И. Мизев[2], Е.А. Мошева[2]**
[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
dmitribratsun@rambler.ru

Проводится обзор возбуждениякогерентных структур водном растворе кислотыи основания, изначально разделенных и помещенных в вертикальной ячейке Хеле-Шоу. При контакте растворов начинается реакция нейтрализации. Процесс сопровождается зависимостью коэффициентов диффузии реагентов от их концентрации, что приводит к новому типу структурообразования. Обнаружено, что при близких значенияхначальных концентраций возникает регулярная ячеистая конвекция, которая жестко сменяется волной плотности, аномально быстро распространяющейся по направлению силы тяжести. Эффект детально исследован экспериментально. Предложена математическая модель явления, численно изучены режимы конвекции.
Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Пермского края МИГ № 29.

## ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК

**К.В. Брушлинский**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*
brush@keldysh.ru

Представлены численные модели равновесных конфигураций плазмы в ряде магнитных ловушек от Z-пинча до ловушек–галатей А.И. Морозова с погруженными в плазму проводниками. Их математический аппарат основан на задачах с системой уравнений магнитной газодинамики. Плазмостатические модели описывают идеализированные строго равновесные конфигурации бесконечно проводящей плазмы, плазмодинамические –формирование квазиравновесия в нестационарном процессе с учетом конечной проводимости плазмы и конкретных условий задачи. Основное внимание уделено устойчивостиконфигураций в линейном приближении. Рассмотрены МГД-устойчивость относительно произвольных малых возмущений и частные случаи устойчивости в пределах размерностей, ограниченных симметрией ловушки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

**Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов**

*Институт механики МГУ, Москва*
zabelinsky2013@yandex.ru

В работе приведены результаты исследованийэволюции излучения ударно нагретого воздуха за фронтом сильных ударных волн в диапазоне скоростей от 6 до 11,4 км/с и давлений от 0.25 до 1 Торр. Приведены интегральные по времени развертки излучения (панорамные спектры), а также временные зависимости интенсивности излучения отдельных молекулярных линий в абсолютных единицах. Представленные в работе данные получены на экспериментальном комплексе НИИ механики МГУ "Ударная труба". Экспериментальный комплекс оснащен системой регистрации, позволяющей фиксировать в одном эксперименте абсолютные значения интегральной по времени спектральной плотности излучения в диапазоне длин волн 120-1100 нм и эволюцию во времени излучения в выбранном узком спектральном интервале.

## АНАЛИЗ ТЕМПОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ГЕЛИЯ МИКРОСФЕРАМИ ДЛЯ ДИСПЕРСНЫХ ЗАСЫПОК

**А.С. Верещагин, В.Н. Зиновьев, И.В. Казанин, А.Ю. Пак, В.А. Лебига, В.М. Фомин**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск*
vereshchag@itam.nsc.ru

Разрабатывается математический аппарат для описания сорбции гелия микросферами при их дисперсионном распределении. Выводится аналитическое решение изучаемой задачи и на его основе производится разложение экспериментальных кривых поглощения гелия микросферами на гармоники, позволяющих провести анализ временных характеристик сорбционного процесса.
Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-41-540012 р_а, комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018-2020~гг. номер проекта 0323-2018-0023, Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610134-9).

## СВЧ РАЗРЯДНОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В ПОТОКЕ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

**В.А. Виноградов, Д.В. Комратов**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*
komratovdv@ciam.ru

Представлены результаты экспериментального исследования зажигания пропано-воздушной смеси с помощью СВЧ разряда. Работа направлена на исследование поджигания топлива, как в дозвуковом, так и сверхзвуковом потоках в условиях близких к высотному запуску газотурбинного двигателя или работе камер сгорания гиперзвукового летательного аппарата. Приведены отличительные особенности и преимущества применения СВЧ стримерного разряда. Получены параметры температуры и давления в горящем факеле рабочей части при различных соотношениях расходов пропана и воздуха.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00271.

## СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ ГИДРОМЕХАНИКИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИЗ СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ

**Н.А. Верезуб, А.И. Простомолотов**

*Институт проблем проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
verezub@ipmnet.ru

Исследованы процессы гидродинамики и массообмена в оригинальной конструкции проточного кристаллизатора для выращивания смешанных кристаллов KCNSH из смеси двух водно-солевых растворов (кобальтовой KCSH и никелевой KNSH солей). Дано объяснение причин возникновения дефектов перемежаемости темных и светлых участков на поверхности растущего кристалла, выявляемых с помощью рентгеновской топографии. Предложена закрутка раствора, вытекающего из трубки с большой скоростью, для устранения радиальной неоднородности состава растущего смешанного кристалла.
Работа выполнена на вычислительной базе ИПМех РАН (тема № АААА-А17-117021310373-3) при поддержке грантов РФФИ: 18-02-00036, 17-08-00078 и гранта РНФ: 18-12-16007.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПОЯСА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОСУДА В УСЛОВИЯХ ГИДРОНЕВЕСОМОСТИ

**А.С. Виноградова, Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

vinogradova-as@mail.ru

В данной работе изучена устойчивость осесимметричной, неодносвязной поверхности несжимаемой, однородной, изотермической жидкости на внутренней поверхности цилиндрического сосуда в условиях гидроневесомости. Построена граница области устойчивости. В эксперименте роль такого жидкого пояса выполняет магнитная жидкость в магнитном поле катушки с током. Экспериментально показано, что при выключенном токе, в зависимости от объема магнитной жидкости, возможны три качественно разных положения магнитной жидкости. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-501-12011.

## НЕПРЕРЫВНАЯ ГАЗОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ В ПЛОСКОЙ РАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ОТТОКОМ НА ПЕРИФЕРИЮ

**Д.В. Воронин**

*Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

voron@hydro.nsc.ru

Проведено численное моделирование течения химически реагирующего газа в плоской радиальной камере с использованием уравнений Навье-Стокса. Модель основана на законах сохранения массы, импульса и энергии для случаев трехмерного и двумерного (с осевой симметрией) нестационарного течения сжимаемого газа. Учитывались процессы вязкости, теплопроводности, диффузии, турбулентности и химические реакции. Топливо и окислитель подавались в камеру раздельно. Численно показана возможность детонационного способа горения смеси в камере. Возможен срыв детонации и неполное сгорание топлива с последующим выходом реагентов в атмосферу.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-540001 р_а.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТЯЖЕЛЫМ РЕАГИРУЮЩИМ ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЕМ

**П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

sutyrin@imec.msu.ru

Численно исследуется взаимодействие ударной волны с газовым пузырем, заполненным горючей смесью повышенной плотности. Описано преломление падающей волны, формирование и фокусировка поперечных скачков в двух режимах – внешнем и внутреннем. Выявлены три режима инициирования детонации: (1) прямое, (2) при преломлении падающей волны и (3) в точке фокусировки внутри пузыря. Исследована зависимость режима воспламенения смеси от числа Маха волны, плотности и формы пузыря. Показано, что при прочих равных форма пузыря в некоторых случаях обеспечивает инициирование детонации или наоборот, исключает воспламенение.Работа выполнена при поддержке РФФИ(проекты 16-29-01092 и 18-01-00793).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ СО СТАЦИОНАРНОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

**В.Ю.Гидаспов, Д.С. Кононов, Н.С. Северина**

*Московский авиационный институт, Москва*

severina@mai.ru

Приводятся физико-математическая модель, вычислительные алгоритмы и результаты численного моделирования химически равновесного и неравновесного течений в канале переменного сечения с участками сужения и расширения со сжиганием топлива в стационарной детонационной волне с последующим разгоном потока до сверхзвуковой скорости. С использованием квазиодномерной нестационарной модели исследована устойчивость течения со стационарной детонационной волной. Показано, что детонационная волна является устойчивой в расширяющемся канале и неустойчивой в сужающемся канале.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 9.7555.2017/БЧ.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ, ИНИЦИИРУЕМЫХ РАЗМЫКАНИЕМ ПЕРВОНАЧАЛЬНО СОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

**А.П. Глинов, А.П. Головин, П.В. Козлов, Г.А. Любимов, К.В. Шалеев**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

*Научно-исследовательский институт механики, Москва*

krestytroitsk@mail.ru

Проведено исследование влияния различных режимов инициирования дуг путем размыкания первоначально сомкнутых электродов на их устойчивость и динамику межэлектродной среды. Показано, что можно обеспечить режимы стабильного горения протяженных (вплоть до 30 см) вертикальных электрических дуг с силой тока до 700 А с помощью массивных анодов и согласованного размыкания электродов. Показано, что достаточно сильные возмущения разрядного промежутка способны дестабилизировать или погасить электрическую дугу. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-21022.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТВОДА ТЕПЛА С ПОМОЩЬЮ СОЖ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

**А.В. Грезина, А. Г. Панасенко**

*Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского*

aleksandra-grezina@yandex.ru, A.G.Panasenko@yandex.ru

В работерассматривается численное моделирование процесса отведения тепла, выделяющегося при обработке металла резанием. В качестве инструмента моделирования используются технологии, реализованные в программном комплексе FlowVisionHPC. Рассматривается вариант отвода тепла, которое выделяется при растачивании глубоких отверстий, с помощью смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). СОЖ подаётся в зону резания по каналу, созданному внутренней поверхностью растачиваемого отверстия и внешней поверхностью борштанги, а отводится по внутреннему каналу борштанги. Сравниваются результаты расчёта с экспериментальными данными.

## ТРАНСПОРТ КОМПОНЕНТОВ БИНАРНЫХ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В ТОНКИХ КАНАЛАХ

**В.А. Демин[1], М.И. Петухов[1], А.И. Мизев[2], А.В. Шмыров[2]**

[1]*Пермский государственный национальный исследовательскийуниверситет, Пермь*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

demin@psu.ru

Проведено теоретическое исследование процессов разделения бинарных легкоплавких металлических расплавов с эвтектической диаграммой состояния в тонких неоднородно нагретых капиллярах. На основе законов и уравнений, справедливых для многофазных гидродинамических систем, построена физическая модель, описывающая макроскопическое движение в расплаве и процесс разделения жидкой смеси на компоненты. Определено время разделения, воспроизведены характерные концентрационные вилки, демонстрирующие динамику разделения, получено количественное согласие с экспериментом для концентраций компонентов в различных сечениях. Работа финансировалась Правительством Пермского края (грант № С-26/788 от 25.12.2018).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ, РАБОТАЮЩЕЙ НА БЕДНОЙ СМЕСИ МЕТАНА И ВОЗДУХА

**М.В. Дробыш, А.Н. Дубовицкий, А.Б. Лебедев, Е.Д. Свердлов, К.Я. Якубовский**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

andubovickiy@ciam.ru

Проведено исследование процесса турбулентного горения бедной смеси метана и воздуха дляпромышленной камеры сгорания без закрутки потока и с высокой степенью гомогенизации смеси.Для расчета газодинамической структуры потока, смешения, горения и образования загрязняющих веществ использовались подходы, основанные на решении трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для потока с горением: методы RANSи LES, модель горения Зимонта, а также модель расчета NO, $NO_2$и CO, разработанная авторами.Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, полученными для реальной камеры сгорания на промышленном стенде. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-01045.

## НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙМЕТАН/ВОДОРОД – ВОЗДУХ С ПОДАЧЕЙ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА В ПРОДУКТЫ ДЕТОНАЦИИ

**С.А. Ждан, Ф.А. Быковский, Е.Ф. Ведерников**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

zhdan@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований контролируемой непрерывной спиновой детонации смесей метан/водород – воздух в кольцевой камере сгорания типа ВРД диаметром $d_c$ = 503 мм. Изучалось влияние подачи вторичного воздуха в продукты сгорания на параметры детонационных волн, давлений в камере и удельный импульс. Для горючего трех составов ($CH_4 + 2H_2$; $CH_4 + H_2$; $CH_4$) показано, что подача добавочного воздуха в продукты детонации увеличивает скорость непрерывной спиновой детонации, давление в камере и тягу, уменьшает удельный расход горючего.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00270.

## О СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

**Т.А. Журавская[1,2], В.А. Левин[1-3]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

[3]*ИАПУ ДВО РАН, Владивосток*

zhuravskaya@imec.msu.ru

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, численно исследовано детонационное горение стехиометрической водородно-воздушной смеси с целью определениямеханизмов управления детонацией. Предложены способы управления положением детонационнойволны, стабилизированной в сверхзвуковом потоке в плоском канале с сужением, с целью

повышения эффективности сжигания газа. Установлено, что предварительная подготовка смеси (разложение части молекулярного водорода и молекулярного кислорода в атомарные газы) может рассматриваться как способ управления детонацией.
Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (договор 14.G39.31.0001 от 13.02.2017) и РФФИ (проекты 16-29-01092, 18-01-00883).

## ВЛИЯНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В ДИССОЦИИРОВАННЫХ ГАЗАХ

**Г.Н. Залогин, А.В. Красильников**

*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Королев, Московская область*

krartur@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований в высокочастотном плазмотроне влияния каталитических свойств различных покрытий на величину теплового потока к модели в потоках диссоциированного воздуха, азота и углекислого газа, а также результаты анализа структуры покрытий, полученных на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения. Покрытия наносились на медный тепловоспринимающий элемент калориметрического датчика теплового потока в процессе эксперимента. Это позволяло проводить сравнение величин тепловых потоков к медной поверхности и покрытию.

## ДИНАМИКА РАСПАДА ДВИЖУЩЕГОСЯ ПЛОСКОГО РАЗРЫВА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИИ ЕГО ФРОНТА

**И.А. Знаменская**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

znamen@phys.msu.ru

Экспериментально реализован и исследован процесс формирования газодинамического течения при распаде разрыва на фронте движущейся ударной волны в прямоугольном канале. 3 новых разрыва формируются за субмикросекундные времена в результате мгновенного возникновения плоской границы газ-плазма в процессе самолокализации наносекундного объемного разряда на фронте проходящей волны. Динамический процесс исследован высокоскоростными цифровыми камерами как в субмикросекундном диапазоне (плазмодинамика), так и в диапазоне микросекундном (сверхзвуковая газодинамика) путем непрерывной съемки изображений движущихся разрывов на основе панорамных методов. Впервые получены x-t диаграммы движения поверхностей разрыва в обоих временных диапазонах. Проведено сравнение с результатами численного моделирования. :Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №. 18-19-00672

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫСОКО-СКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**В.Н. Зудов, П.К. Третьяков, А.В. Тупикин**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск*

zudov@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования воздействия сфокусированного импульсно-периодического излучения $CO_2$-лазера на инициирование и развитие процесса горения в до- и сверхзвуковом потоке гомогенных топливо-воздушных смесей ($H_2$+air, $CH_4$+air). Излучение $CO_2$-лазера распространялось поперек потока и фокусировалось на оси струи. Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом. Изображение фиксировалась скоростной камерой со временем экспозиции 1.5 мкс и частотой 1000 кадр/с. Одновременно велась спектрозональная регистрация (на длине волны излучения радикалов OH* и CH*) и эмиссионной спектроскопия (в диапазоне длин волн 210-780 нм). Получено устойчивое воспламенение метано- и водородовоздушной смеси при сверхзвуковом истечении в затопленное пространство. Результаты спектрозональной съемки свидетельствуют о протекании реакций горения в следе за областью оптического разряда.
Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 19-08-00304.

## АНОМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ ПАР-ЖИДКОСТЬ В ЖИДКОСТИ ШТОКМАЙЕРА И МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ

**А.С. Иванов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

lesnichiy@icmm.ru

Представлена физическая интерпретация и проверочный эксперимент, подтверждающий обнаруженное ранее аномальное поведение коэффициента поверхностного натяжения на межфазной границе «газ-жидкость» в магнитных коллоидах, претерпевающих фазовый переход первого рода вида под действием внешнего магнитного поля. Интерпретация дана в рамках модели жидкости Штокмайера. Экспериментальное подтверждение эффекта получено в опытах по изучению неустойчивости Плато-Рэлея конденсированной капли жидкой фазы феррожидкости, развивающейся после выключения внешнего магнитного поля. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-10010.

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛИЯНИЯ ИСПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕСНОЙ ПОЖАР

**М.Н. Ильичева, А.А. Лощилов,Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород*

poman99@mail.ru

Одним из способов тушения лесных пожаров является создание полосы, не содержащей горючего, которая останавливает пламя. Наиболее быстрым способом создания такой полосы является импульсное воздействие. Сложностью использования данного подхода является одномоментность воздействия, которое нельзя скорректировать в процессе тушения пожара, как при тушении водой. В работе выполняется анализ ключевых процессов, имеющих место при импульсном воздействии. Сделано вывод о том, что динамика процессов существенно зависит от плотности пористого слоя. В некоторых случаях возможно возникновения волны горения от импульсного воздействия.

## РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ В ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОДЕЛИ

**М.М. Кабилов, И.И. Халимов**

*Российско-Таджикский (Славянский) университет, Душанбе*

maruf1960@mail.ru

Рассматривается, режимы горения водородо и метановоздушной смеси в инертной пористой среде в рамках эквивалентной модели фильтрационного горения газов. Модель построено, в результате, преобразования основных уравнений сохранения энергии пористой среды и смеси газов, массы реагирующего компонента газа и состояния. Данная модель позволяет аналитическим образом описать структуры волны в субадиабатических и сверхадиабатических режимах горения с позиции нестационарного распространения волны. Анализируется граничные условия, и приводятся расчётные профили температур фаз и концентрации, а также характеристики волны в зависимости от параметров системы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ КЛАССИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**М.М. Кабилов[1], А.О. Холов[2]**

[1]*Российско-Таджикский (Славянский) университет, Душанбе*

[2]*Институт математики им. А. Джураева АН Республики Таджикистан, Душанбе*

maruf1960@mail.ru

В работе рассматривается одномерная и однотемпературная математическая модель стационарного распространения волны горения смеси газов в инертной пористой среде. Излагается метод получения аналитического решения рассмотренной модели. Это решение представляет собой функции температуры и доли концентрации от продольной координаты и получено при условии подобия профилей температуры системы и концентрации компонента смеси. Условие подобия состоит из произведения числа Льюиса компонента газа и некоторого параметра зависящего от скорости волны и других постоянных. Кроме того, получены формулы для температуры и плотности при максимальном градиенте температуры.

## О ВЛИЯНИИ ДИВЕРГЕНТНОЙ ЧАСТИ ЭНЕРГИИ ФРАНКА НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ НА ОРИЕНТАЦИОННУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

**А.Г. Калугин**

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

kalugin@mech.math.msu.su

В работе предлагается объяснение механизма ориентационной неустойчивости, связанной с наличием дивергентных слагаемых в свободной энергии Франка нематических жидких кристаллов. Показано, что при достаточно большой величине коэффициента при этих слагаемых свободная энергия может быть знаконеопределенной, а однородное состояние поля ориентации не обеспечивает ее минимум и является неустойчивым.В качестве примера рассматриваются задачи о возмущениях однородного состояния нематика в слое и полупространстве. В результате решения таких задач получены соотношения, связывающие дивергентный коэффициент с другими параметрами среды, и дано объяснение ряду экспериментальных эффектов.

## РМГД МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ РЯДА КОЛЬЦЕВЫХ ТОКОНЕСУЩИХ ПРОВОДНИКОВ И НОВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УТС

**А.Н. Козлов [1,2]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,механико-математический факультет*

andrey-n-kozlov@mail.ru

Рассмотрена инжекция высокоскоростных потоков плазмы в ряд кольцевых проводников с током. В качестве инжектора используется квазистационарный плазменный ускоритель (КСПУ). Исследования осесимметричных течений плазмы проведены на основе уравнений радиационной магнитной газодинамики (РМГД), представленных в терминах векторного потенциала магнитного поля с учетом электропроводности, теплопроводности и переноса излучения. Выявлена возможность поэтапного или "эстафетного" увеличения значений температуры плазмы в результате торможения потока в магнитном поле последовательного ряда кольцевых проводников с током.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-11-10278.

## ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ДО- И СВЕРХЗВУКОВОМ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ СОПЛА (ЯВЛЕНИЕ ЗАПИРАНИЯ)

**В.В. Козлов**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск*

kozlov@itam.nsc.ru

Представлены результаты исследования явления запирания микросопла при диффузионном горении микроструи водорода на больших скоростях её истечения. Обнаружено, что причиной запирания микросопла является нагрев стенок сопла, сохраняющейся вплоть до трансзвуковых скоростей и не позволяющей соплу охладиться и перейти струе на сверхзвуковую скорость истечения. Показано, что поджигание водорода вдали от среза сопла при развитом сверхзвуковом истечении водорода в затопленное пространство приводит к исчезновению области перетяжки пламени, отрыву пламени от среза сопла и, соответственно, прекращению нагревания сопла и возможности выхода микроструи на сверхзвук.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16–19–10330.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА КАТАЛИТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ДО- И СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА

**А.Ф. Колесников[1], С.А. Васильевский[1], А.Н. Гордеев[1], В.И. Сахаров[2], А.В. Чаплыгин[1]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[2]*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

koles@ipmnet.ru

Исследован теплообмен водоохлаждаемых поверхностей металлов (Au, Ag, Cu, Mo, Be, Ta, Nb)и кварца в до- и сверхзвуковых струях диссоциированного воздуха. Эксперименты проведены на 100-киловаттном ВЧ-плазмотроне. Выполнено численное моделирование обтекания моделей струями высокоэнтальпийного воздуха. Определены коэффициенты рекомбинации атомовдля рассмотренных материалов. Получены оценки теплового эффекта каталитичности поверхности затупленных тел при входе в атмосферу Земли. Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А17-117021310383-2при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00054.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ УПОРЯДОЧЕННОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СТРУКТУР В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

**Н.В. Колчанов**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Перьм*

kolchanovn@gmail.com

В работе экспериментально исследуется гравитационная конвекция в горизонтальном слое магнитной жидкости в околокритической области. При помощи тепловизора получены термограммы поверхности жидкости. Термограммы позволили изучить специфические конвективные течения, возбуждающиеся в магнитной жидкости после потери устойчивости механического равновесия. Особенность этих течений заключается в том, что нестационарное поведение термиков происходит в рамках некоторой упорядоченной в пространстве структуры, форма которой зависит от свойств магнитной жидкости. Работа выполнялась при поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## О КАПИЛЛЯРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТРУИ ФЕРРОЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**В.М. Коровин**

*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

verazhan@yandex.ru

Рассмотрена струя феррожидкости, находящаяся внутри соленоида. Струя моделируется цилиндрическим объемом несжимаемой невязкой жидкости, движущейся с постоянной скоростью параллельно оси цилиндра. Оси струи и соленоида совпадают. Допускается изменение напряженности создаваемого соленоидом магнитного поля в любом диапазоне. Исследовано влияние магнитных сил на длину волны наиболее быстро растущих возмущений формы поверхности струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-01-00037.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СТОЛКНОВЕНИЯ МОЛЕКУЛ АЗОТА И КИСЛОРОДА С УЧЕТОМ ВНУТРЕННИХ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

**В.В. Косьянчук[1,2,3], А.Н. Якунчиков[1,2,3]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

[2]*Научно-исследовательский Институт механики МГУ, Москва*

[3]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

vasiliy_ksnk@mail.ru

В работе изучается процесс столкновения и перераспределения энергии двухатомных молекул азота и кислорода в широком диапазоне прицельных параметров (поступательной и вращательной энергии, прицельного расстояния, ориентации молекул, фаз враще-

ния) при температурах до 2000K.Для решения задачи проведена серия из большого числа($\sim 10^9$)молекулярно-динамических расчетов парных столкновений молекул. Выявлены свойства, которые не отмечаются в существующих классических моделях. Показано, как угол разлета молекул, и коэффициенты обмена энергией в столкновении зависят от рассматриваемых прицельных параметров.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20025.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ НА КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ В НЕРАВНОВЕСНЫХУСЛОВИЯХНА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ

**А.Л. Кусов**

*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королёв*

kusoval@tsniimash.ru

Рассмотрена задача о численном моделировании излучения для условий отсутствия равновесной заселённости уровней энергии в разреженной низкотемпературной плазме, образующейся вокруг космического аппарата, входящего в атмосферу Земли. Расчеты как газодинамического течения, так и переноса излучения проведены методом прямого статистического моделирования Монте-Карло. Расчёт переноса излучения производится одновременно с расчётом газодинамических полей, при этом учитывается, что состояние молекул меняется при излучении. Расчёты сравниваются с данными лётных экспериментов BSUV-2 и Stardust, а также с данными об излучении в ударных трубах

## ВРАЩАЮЩАЯСЯ ДЕТОНАЦИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ

**В.А. Левин[1,2,3], И.С. Мануйлович[1,2], В.В. Марков [1,2,4]**

[1]*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,*

[3]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

[4]*Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва*

ivan.manuylovich@gmail.com

Представлены результаты численного исследования вращающейся детонации в трехмернойкамере сгорания при радиальной подачей горючей смеси. Реализована система подачи смеси с учётом соотношения давления в резервуаре и статического давления в камере сгорания на входе в неё. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова, в оригинальном программном комплексе, разработанном для проведения многопараметрических расчетов и визуализации течений. Расчеты проведены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов». Проведён цикл расчётов, позволивший реализовать вращающуюся детонацию и исследовать возникающие ударно-волновые структуры течения при различных значениях давления и температуры торможения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-29-01092).

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ

**Е.Л. Лобода[1, 2], М.В. Агафонцев[1, 2], О.В. Матвиенко[1], В.В. Рейно[2]**

[1]*Томский государственный университет, Томск*

[2]*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск*

loboda@mail.tsu.ru

В докладе обобщен опыт применения методов инфракрасной термографии и математического моделирования для исследования процессов горения. На примере горения некоторых видов жидких углеводородных топлив и растительных горючих материалов представлены результаты экспериментальных исследований структуры течения в пламени, показана цикличность процесса горения жидких углеводородных топлив со свободной поверхности,установлена взаимосвязь между пульсациями температуры в пламени и его тепловой структурой. В докладе приводится сравнение экспериментальных результатов, полученных с применением инфракрасной термографии, с результатами математического моделирования.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ФАЗ В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

**Г.Л. Лосев, А.Д. Мамыкин, И.В. Колесниченко**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Losev.g@icmm.ru, MAD@icmm.ru, KIV@icmm.ru

В работе исследуется процесс электромагнитной сепарации слабо проводящих включений в электролитическом растворе в плоском вертикальном канале под действием электромагнитных сил. Генерация силы производится за счет пропускания электрического тока через раствор, помещенный во внешнее постоянное магнитное поле. Воздействие электромагнитной силы позволяет добиться локализации частиц примеси и исключения их из основного потока. Успешно разработана и применена методика определения концентрации на основе оптических измерений. Получена зависимость эффективности сепарации от величины внешнего электромагнитного воздействия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и правительства Пермского края (проекты РФФИ 16-08-01033 а и С-26/788).

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СТРУЙНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПЯТНАМИ

**В.В. Лукашов[1], В.В. Леманов [1], Ю.Н. Дубнищев [1,2], В.А. Арбузов [1,2]**

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

luka@itp.nsc.ru

Экспериментально установлено существование крупных вихревых структур в присоединённом диффузионном пламени, порождаемых ламинарно- турбулентным переходом в подводящей трубке. Методом гильбер- визуализации рассмотрено горение предварительно перемешанного с воздухом пропана и пламя разбавленного $CO_2$ водорода. Характер взаимодействия вихревых структур «пятен»с фронтом пламени в этих системах существенно различается.В пропано- воздушном факеле пламя оставалось ламинарным и при возникновении в приосевой области турбулентного пятна. Особенностью динамики водородного факела является нарушение целостности внешней границы факела после пролёта турбулентных пятен.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-08-00958.

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ ОБЪЕКТЫ С ХИМИЧЕСКИМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ И ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

**Н.А. Луценко[1,2], В.А. Левин[1,3]**

[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

[2]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

[3]*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

NickL@inbox.ru

Предложены математические модели и численные методы расчета процессов при движении газа в различных пористых объектах с химическими превращениями и фазовыми переходами. В моделях комбинируются подходы механики сплошных многокомпонентных сред и теории фильтрационного горения. Рассмотрены задачи горения различных пористых систем при принудительной фильтрации и естественной конвекции, зарядки/разрядки тепловых аккумуляторов на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами, газификации твердого горючего в газогенераторе высокоскоростного летательного аппарата.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы «Дальний Восток» 2018–2020 (проект 18-5-064) и РФФИ (грант 18-29-24029-мк).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГИ СОПЕЛ И СПЕКТРА ЕЁ ПУЛЬСАЦИЙ

**В.В. Марков[1,2,4], В.А. Левин[1,2,3], Н.Е. Афонина[1], В.Г. Громов[1], А.Н. Хмелевский[1,2]**

[1]*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,*

[3]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

[4]*Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва*

markov@mi.ras.ru, markov@imec.msu.ru

Представлены результаты исследований тяги и спектра ее пульсаций в соплах с дефлектором. Установлены зависимости частоты и амплитуды пульсаций тяги и её величины от давления на входе и выходе сопла, от размера его критического сечения и формы дефлектора. Для различных конфигураций сопел определена тяга и основная доминирующая частота спектра её пульсаций, а также сформулированы способы управления тягой и спектром. Представлено сравнение расчетного и измеренного спектра пульсаций давления газа на тяговой стенке кольцевого сопла.

Работа поддержана грантом Министерства Образования и Науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017г.) и грантами РФФИ (№ 16-29-01092 и № 18-01-00883).

## ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ПОЛЯ ВЗРЫВА ЗАРЯДА КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ВОЗДУХЕ

**В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

mva_2805@mail.ru

Определено влияние граничных условий на параметры поля взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (КВВ) в воздухе. Показано, что параметры на фронте ударной волны (УВ) на малых расстояниях существенно зависят от условий расположения заряда КВВ. При подрыве заряда КВВ цилиндрической формы без оболочки с находящимся на свободном торце заряда металлическим цилиндром получено, что распространение УВ с увеличивающейся скоростью происходит в направлении, перпендикулярном оси заряда, и избыточное давление на фронте УВ в этом направлении на 10…60 % выше, а в направлениях вдоль заряда ниже на 400…800 %, чем при взрыве аналогичных зарядов со свободной поверхностью.

## СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СТАДИЙ ЗАПУСКА ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Е.В. Михальченко[1,2], В.Ф. Никитин[1,2]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

[2]*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, г. Москва*

MikhalchenkoLena@yandex.ru

В работе представлено трехмерное численное моделирование двигателя с вращающейся детонационной волной. Рассматриваемый двигатель основан на режиме быстрого горения, отличается рекордной мощностьюна единицу объема по сравнению со всеми другими типами тепловых двигателей. Была написана программа, основанная на математической модели многокомпонентной газовой динамики с химическими превращениями, учитывающая явления переноса в турбулентном режиме ивнешние источники энергии. Математическая модель реализована в виде компьютерной программыметодами высокого порядка точности. Вычисления проводились на отечественном супер-ЭВМ АПК-5. Были исследованы режимы работы двигателя при различных вариантах подачи топлива, с различным количеством и расположением инжекторов, с подачей различных долей горючего и окислителя. Было рассмотрено два типа стабилизации детонационной волны, реализующиеся при дополнительной подаче кислорода или воздуха.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00889.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ ПРИ ГОРЕНИИ

**К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов, В.А. Порязов**

*Томский государственный университет, Томск*

Moiseeva_KM@t-sk.ru

В настоящей работе представлена физико-математическая модель и результаты решения задач искрового зажигания и горения аэровзвеси порошка алюминия. Физико-математическая постановка задачи основана на модели двухфазной реагирующей среды Р. Нигматуллина. Для решения задачи использованы алгоритмы распада произвольного разрыва. В докладе представлены результаты по численному моделированию искрового зажигания взвеси порошка алюминия в воздухе и последующему распространению пламени по аэровзвеси. Целью численного исследования является определение критических условий искрового зажигания порошка алюминия и расчет скорости распространения волны горения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-79-20011.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ БЛОЧНОГО ЗАРЯДА ИЗ ИНГИБИРОВАННЫХ ПЛЁНКОЙ ПОРОХОВЫХ ЗЁРЕН В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ОБЪЁМА

**М.Ю. Немцев[1,2], И.В. Семенов [1,2], Б.С. Ермолаев[3]**

[1]*ФГУ ФНЦ НИИ Системных исследований РАН, Москва*

[2]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

[3]*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва*

maks-ivant@mail.ru, semenov@icad.org.ru

В работе представлены математическая модель и результаты численного моделирования в двумерной осесимметричной постановке задач фильтрации охлажденных пороховых газов в высокоплотном заряде без его воспламенения, а также задачи горения блочного заряда и заряда насыпной плотности, покрытых полимерной пленкой, в условиях постоянного объема. Моделирование проводили с учетом процессов пиролиза полимерной пленки и изменения горящей поверхности в процессе охвата порохового зерна горением. Исследовано влияние начального положения воспламенителя и разлета конденсированной фазы на процесс конвективного горения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-29-01010 офи_м.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

**В.Ф. Никитин[1,2,3], Е.В. Михальченко[1,2]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

[2]*«Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва*

vfnikster@gmail.com

Рассмотренотрехмерное численное моделирование двигателя с вращающейся детонационной волной. В процессе моделирования используются шесть кинетических механизмов: механизм Мааса–Варнаца–Поупа (1992), механизм Хонга (2010), механизм Вильямса (2004), механизм Gri-Mech 3.0 (1992), механизм Ли –Джоу–Казаков –Драер (2004) и авторский кинетический механизм. Математическая модель реагирующей смеси газов реализована в виде компьютерной программыметодами высокого порядка точности. Вычисления проводились на отечественном супер-ЭВМ АПК-5. В работе рассмотрено влияние используемого кинетического механизма на динамику выхода на стационарную работу детонационного двигателя с непрерывной вращающейся детонационной волной.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00889.

## ДИФФУЗИОННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗА В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

**А.Г. Панасенко, А.В. Грезина**

*Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

A.G.Panasenko@yandex.ru, aleksandra-grezina@yandex.ru,

В работе рассматривается задача о распространении газа из микрочастиц в однородном гравитационном поле с учётом вязкости среды, в которой распространяется газ. Получено аналитическое решение (в виде ряда), определяющее зависимость концентрации частиц от высоты и времени. Параметры членов ряда находятся изрешения соответствующего трансцендентного уравнения. При заданных параметрах (высота сосуда, содержащего газ, подвижность частиц и время) распределение концентрации частиц по высоте рассчитывается с помощью стандартного пакета MAPLE.

## МАГНИТОВЯЗКИЙ ЭФФЕКТ В ТОНКОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В СДВИГОВОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

**В.М. Полунин, П.А. Ряполов, А.И. Жакин, Е.В. Шельдешова**

*Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), Курск*

r-piter@yandex.ru

Дана оценка вязкости и ее приращения («магнитовязкий» эффект) в тонком пристеночном слое столбика магнитной жидкости, совершающей колебания в трубке, при наложении сильного поперечного магнитного поля. Расчет вязкости выполнен по формуле, выведенной на основе двух различных теоретических подходов. Для расчета используются опубликованные экспериментальные результаты, прокомментированные ранее в предположении отсутствия полевой зависимости вязкости. Отмечено значение получаемых результатов по «магнитовязкому» эффекту для диагностики межчастичного агрегирования.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания Министерства образования и науки РФ. Код проекта 3.2751.2017/ПЧ.

## МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В СРЕДАХ С МАЛОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

**В.А. Полянский, И.Л. Панкратьева**

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

ilpan@imec.msu.ru

В рамках электрогидродинамики (ЭГД)проведен анализ нескольких различных физических механизмов электризации (образования в среде нескомпенсированного объемного электрического заряда) в электрогидродинамических течениях слабопроводящих многокомпонентных смесей жидкостей и газов. Интерес к этому связан с характерной особенностью изучаемых в ЭГД сред, которые допускают проникновение в них сильных внешних электрических полей. В этом случае можно при наличии в среде нескомпенсированного объемного электрического заряда воздействовать на её поведение приложенным полем за счет объемных кулоновских сил.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-01-00056.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПЛОТНЫМ ОБЛАКОМ ЧАСТИЦ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ КОМПАКТИРОВАНИЯ

**Я.Э. Порошина[1], П.С. Уткин[1,2]**

[1]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

[2]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

pavel_utk@mail.ru

В работе рассмотрена задача о нормальном падении плоской ударной волны на облако частиц насыпной плотности, соответствующей натурному эксперименту. Математическая модель основана на системе уравнений Баера-Нунциато, описывающей двухфазные течения сживаемых сред со значительным объемным содержанием фаз с учетом эффектов уплотнения фазы частиц (компактирования). Разработан соответствующий вычислительный алгоритм. Ключевой стадией алгоритма является процедура релаксации давлений. Описано влияние эффекта компактирования на эволюцию облака частиц под действием проходящей ударной волны.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРУЗКИ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

**В.А. Порязов, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**

*Томский государственный университет, Томск*

poryazov@ftf.tsu.ru

В работе представлена физико-математическая модель и результаты расчета влияния перегрузки на скорость горения смесевого твердого топлива на основе ПХА с добавлением частиц алюминия. Исследовано влияние размера вылетающих с поверхности горения частиц алюминия на линейную скорость горения при заданной величине перегрузки. Определены величины перегрузки, приводящие к осаждению частиц и выходу на режим горения, при котором дальнейшее увеличение перегрузки не приводит к росту скорости горения.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**А.И. Простомолотов, Н.А. Верезуб**

*Институт проблем проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

prosto@ipmnet.ru

Получили развитие математические модели термомеханики для новой модификации метода Бриджмена в виде процесса «кассетной» кристаллизации.Расчеты, выполненные для отдельной кассеты, показали существенное влияние темпов снижения мощности нагревателя на перемещение и форму фронта кристаллизации в ростовом процессе. Показано, что при достаточно быстром снижении нагревательной мощности может происходить смена устойчивого вертикального градиента температуры в кассете на неустойчивый профиль, что вызывает конвективное движение, существенно искривляющее форму фронта кристаллизации, а последнее способствует возникновению дендритного роста.

Работа выполнена на вычислительной базе ИПМех РАН (тема № АААА-А17-117021310373-3) при поддержке грантов РФФИ: 18-02-00036, 17-08-00078.

## ГИДРОМЕХАНИКА В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСТВОРА

**А.И. Простомолотов, Н.А. Верезуб**

*Институт проблем проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

prosto@ipmnet.ru

Разработана трехмерная математическая модель перспективного проточного кристаллизатора для скоростного выращивания кристаллов дигидрофосфата калия (KDP) из водно-солевого раствора. Структуры течения раствора были визуализированы с помощью алюминиевой пудры. Проанализировано влияние на структуру течения способа прокачки раствора через кристаллизатор и вращения в нём мешалки, имеющей трехмерную форму.

Работа выполнена на вычислительной базе ИПМех РАН (тема № АААА-А17-117021310373-3) при поддержке грантов РФФИ: 18-02-00036, 17-08-00078, 16-29-11785.

## ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ СО СКАЧКОМ СЕЧЕНИЯ

**К.Е. Рыльцева, Е.И. Борзенко, Г.Р. Шрагер**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

kiraworkst@gmail.com

Рассматриваются ламинарные стационарные течения жидкости Шведова-Бингама в трубах со скачком сечения. Основные уравнения записываются в переменных функция тока-вихрь. Устранение сингулярности в реологическом уравнении осуществляется методом регуляризации. Для численного решения стационарной задачи используется метод установления с последующей реализацией алгоритма расчета на основе конечно-разностной схемы переменных направлений. В результате параметрических расчетов получены зависимости геометрических характеристик потока и величин местных гидравлических сопротивлений от значений безразмерных параметров. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00021).

## ГИДРОДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ, ЗАПОЛНЕННОМ МАГНИТНОЙ ЖИДКСОТЬЮ, В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**П.А. Ряполов, В.М. Полунин, Е.А Соколов**

*Юго-западный государственный университет, Курск*

r-piter@yandex.ru

В работе исследована гидродинамика газовых пузырьков в магнитной жидкости (МЖ), заполняющей плоский канал, находящийся в неоднородном поле кольцевого постоянного магнита, на поверхности которого присутствуют области «магнитного вакуума», что позволяет захватывать и удерживать при движении магнита газовые полости, при придавливании полости ко дну канала происходит отрыв газовых пузырьков. Исследован динамика газовых пузырьков и газовой полости в МЖ в области неоднородного магнитного поля. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-1393.2019.8 и базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ. Код проекта 3.8949.2017/БЧ.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВА ГАЗА В ИМПУЛЬСНОМ МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

**А.И. Сайфутдинов [1], Е.В. Кустова[2], В.А. Лашков [2]**

[1]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ, Казань*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

as.uav@bk.ru

В работе в рамках расширенной гидродинамической модели проведены численные эксперименты по исследованию динамики формирования параметров микроволнового разряда в воздухе, локализованного в максимумах напряженности электрического поля, формируемых специально разработанной фокусирующей системой. Получены все основные параметры плазмы микроволнового разряда. Результаты нагрева нейтрального газа демонстрируют хорошее согласие с полученными ранее экспериментальными результатами. Работа выполнена при поддержке гранта президента МК-272.2019.1 и частично РФФИ №18-08-00707.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.И. Сахаров[1], Б.Е. Жестков [2], И.В. Сенюев [2]**

[1]*Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

sakharov@imec.msu.ru

С помощью расчетно-экспериментальной методики определена каталитическая активность образцов из сверх высокотемпературной керамики на основе диборида гафния. В ЦАГИ на гиперзвуковой аэродинамической трубе ВАТ-104 исследовано обтекание и нагревание керамических дисков при температурах поверхности до 3000 К. Одновременно для условий проведенных экспериментов в рамках уравнений Навье-Стокса было проведено численное моделирование обтекания этих моделей химически неравновесной воздушной плазмой. Сопоставлением расчётных и экспериментальных значений тепловых потоков к поверхности диска определена каталитическая активность керамического материала.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-01-00054 и 18-08-00020.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛЕ С СИЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ ГРАДИЕНТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ

**И.В. Семенов[1,2], Р.С. Соломатин[1,2]**

[1]*ФГУ ФНЦ НИИ Системных исследований РАН, Москва*

[2]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

semenov@icad.org.ru

В работе представлены результаты численного исследования механизма распространения детонационной волны (ДВ) в канале, заполненном неоднородной водородно-воздушной смесью с поперечным градиентом концентрации. Особенностями распространения ДВ являются: образование разномасштабных ячеистых структур, а также периодическое образование поперечной волны в нижней части канала в области бедной смеси, которая распространяется в верхнюю часть канала, где находится богатая смесь. Скорость ДВ в неоднородной смеси ниже скорости ДВ в однородной с соответствующей концентрацией водорода на 49%, что согласуется с экспериментом.

Расчеты выполнены на многопроцессорной вычислительной системе «МВС-10П» МСЦ РАН.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ И ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ БАРРОУСА-КУРКОВА

**Р.С. Соломатин[1,2], И.В. Семенов [1,2]**

[1]*ФГУ ФНЦ НИИ Системных исследований РАН, Москва*

[2]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

roman.solomatin.94@gmail.com, semenov@icad.org.ru

В работе представленыматематическая модель и вычислительный алгоритм для расчета смешения и горения параллельных сверхзвуковых потоков воздуха и водорода в камере сгорания Барроуса-Куркова. Для описания турбулентного смешения используется модель Спаларта-Аллмараса. Моделирование химических реакций выполняется с помощью кинетического механизма, состоящего из 22 реакций. В основе вычислительного алгоритма лежит метод GMRES-LU-SGS с гибридной схемой интегрирования по времени. Моделирование проведено в 2D и 3D постановках. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Расчеты выполнены на многопроцессорной вычислительной системе «МВС-10П» МСЦ РАН.

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МГД-ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ В ПРИСУТСТВИИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Е.В. Степин**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

eugene.v.stepin@gmail.com

Доклад посвящен одному из актуальных с прикладной точки зрения направлений плазмодинамики – течениям плазмы в каналах плазменных ускорителей. Представленырезультаты математического моделирования осесимметричных течений в коаксиальных каналах типа сопла в присутствии внешнего продольного магнитного поля. Аппарат моделирования основан на численном решении соответствующих математических задач с уравнениями магнитной газодинамики. Основное внимание уделено изучению влияния геометрии канала и внешнего магнитного поля на характеристики ускорительного режима течения, в том числе и в случае перехода потока через альфвеновскую скорость, соответствующую продольному полю.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00351.

## ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЯХ ПОГРУЖЕННОГО ПОРИСТОГО ШАРА

**Н.Г. Тактаров**

*Мордовский государственный педагогический институт, Саранск*

n.g.taktarov@mail.ru

Определены течения вязкой жидкости, вызванные: 1) поступательно-колебательным и 2) вращательно-колебательным движением погруженного в нее пористого шара. В приближении Стокса получены точные аналитические решения нестационарного уравнения Бринкмана внутри шара и уравнения Навье-Стокса вне его для обоих случаев движения шара. Определены: сила сопротивления, действующая на контрольную сферическую поверхность, ограничивающую пористый шар, в первом случае и момент сил трения на сферической поверхности, ограничивающей пористый шар, во втором. Показано, что в частных случаях из полученных результатов следуют известные ранее решения задач о колебаниях твердой непроницаемой сферы в жидкости.

## ГЕЛИКОИДАЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ

**А.В. Трилис**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

trilisav@hydro.nsc.ru

В работе проведено моделирование и выявление особенностей начального (линейного) этапа развития вращающихся поперечных детонационных волн в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания. Решена возникающая на данном этапе задача линейной модовой устойчивости цилиндрического фронта горения в радиально расходящемся дозвуковом потоке с малым числом Маха.Получены квазисобственные частоты и аналитические выражения для акустических мод колебаний и волн. Показано существование вращающихся окружных волн возмущения фронта горения с конечным количеством локальных пучностей. Исследована механика окружных волн неустойчивости, получены скорости вращения и скорости роста по времени амплитуды этих волн.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛАБОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЛАМЯ В ЛАМИНАРНОМ И ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

**А.В. Тупикин[1], В.В. Замащиков[2]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск*

tupikin@itam.nsc.ru

В работе рассмотрены вопросы, связанные с изучением механизмов управления горением углеводородных топлив с помощью электрических полей. Показано, что воздействие слабого электрического поля на горение в ламинарном режиме ведет к измененюстепени растяжения пламени (критерия Климова-Карловица), а в турбулентном режиме коэффициента турбулентного обмена. Для условий аксиальной симметрии сделаны оценки изменения относительных величин степени растяжения пламени и коэффициента турбулентного обмена при наложении внешнего постоянного электрического поля на пламя.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проекты АААА-А17-117030610135-6 и ААА-А17-117112 00018-4).

## ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ЭФФЕКТОВ

**В.В. Тюренкова[1,2]**

[1] *Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва*

[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

tyurenkova.v.v@yandex.ru

Обычно математическая модель для горения одиночной капли строится в предположении о равновесном состоянии фазового перехода. Это допущение эффективно для больших капель и плоских поверхностей, но дает существенную ошибку для малых капель.В данной работе исследуется диффузионное горение капли горючего в атмосфере газообразного окислителя с учетом неравновесных эффектов на поверхности фазового перехода. В модели учитывается наличие одной брутто-реакции и, как следствие, существование одной поверхности диффузионного пламени, а также возможность образования нескольких поверхностей, на которых протекают независимые брутто-реакции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00248.

## ЭЛЕКТРОВРАЩЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ КАПСУЛЫ В ПРИЛОЖЕННОМ ОДНОРОДНОМ ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**А.Н. Тятюшкин**

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

tan@imec.msu.ru

Теоретически исследуется электровращение капсулы в приложенном однородном постоянном электрическом поле. Капсула представляет собой сферическую оболочку, содержащую слабопроводящую поляризующуюся вязкую жидкость и взвешенную в другой слабопроводящей поляризующейся вязкой жидкости. Учитывается влияние поверхностной проводимости на внутренней и внеш-

ней поверхностях оболочки. С использованием приближений электрогидродинамики, Стокса и квазиустановившегося течения получены уравнения, определяющие электрическое поле и течение жидкостей внутри и вне оболочки. Найдена угловая скорость установившегося электровращения.
Частично поддержано грантами РФФИ № 19-01-00056 и № 17-01-00037.

## ДЕФОРМАЦИЯ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ПРИЛОЖЕННОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**А.Н. Тятюшкин**
*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*
tan@imec.msu.ru

Теоретически исследуются деформационные колебания капли магнитной жидкости, взвешенной в несмешивающейся с ней другой магнитной жидкости, в переменном магнитном поле. Используются приближения квазистационарного магнитного поля и квазиустановившегося течения. Скорость, давление, напряженность магнитного поля и форма капли найдены с точностью до членов второго порядка по малому параметру, малость которого обеспечивает малость деформаций. Установлено, что с точностью до членов второго порядка вращающееся магнитное поле вызывает вращение жидкости внутри и вне капли. Найдены угловые скорости, характеризующие это вращение.
Частично поддержано грантами РФФИ № 19-01-00056 и № 17-01-00037.

## ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В МНОГОФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ

**П.С. Уткин[1], А.И. Лопато[1], А.А. Васильев[2]**
[1]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*
[2]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*
lopato2008@mail.ru

Работа посвящена численным и экспериментальным исследованиям инициирования детонации в многофокусирующей системе, состоящей из плоского канала с профилированным торцом. Рассматриваются две геометрии торцевой части – два полуэллиптических отражателя с участком плоской стенки и пять соприкасающихся отражателей. Математическая модель основана на двумерной системе уравнений Эйлера и одностадийной химической кинетике. Вычислительный алгоритм позволяет использовать полностью неструктурированные расчетные сетки. Описаны механизмы инициирования детонации. Сопоставлены рассчитанные и экспериментальные критические числа Маха падающей волны.
Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

## ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ ТОПЛИВНЫХ СТРУЙ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И СМЕШЕНИЕ В КАНАЛЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

**Н.Н. Федорова[1,2], М.А. Гольдфельд[1],С.А. Вальгер[1,2]**
[1]*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск*
nfed@itam.nsc.ru

Представлены результаты совместных экспериментальных и расчетных исследований сверхзвуковых турбулентных течений в канале с учетом инжекции встречных струй водорода. Результаты расчета и эксперимента сопоставлены по распределению статического давления на стенках канала. Показано, что высота проникновения встречных струй существенно меньше, чем в случае инжекции в свободный поток. Изучено влияние коэффициента динамического напора струй на структуру течения и параметры смешения.
Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610139-4) при поддержке РФФИ (грант № 17-08-01158 А).

## ВЕРИФИКАЦИЯ ЯЧЕЕЧНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНЫ

**А.Н. Филиппов[1], С.А.Шкирская[2]**
[1]*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва*
[2]*Кубанский государственный университет, Краснодар*
filippov.a@gubkin.ru

Основываясь на подходе Онзагера кнеравновесным изотермическим процессам и ячеечном методе, впервые получена алгебраическая формула для определения электроосмотической проницаемости ионообменной мембраны. Ячеечная модель верифицирована на экспериментальных данных по электропроводности и электроосмотической проницаемости водного раствора соляной кислоты через чистую и модифицированную нанотрубками галлуазита и наночастицами платины и железа катионообменную мембрану МФ-4СК при постоянной плотности тока и заданной концентрации кислоты.
Работа выполнена при поддержкеРФФИ (грант № 17-08-01287) и Минобрнауки (грант № 14.Z50.31.0035).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ МИКРО-И НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В КАНАЛАХ С РАСШИРЕНИЕМ

**Т.А. Хмель, С.А. Лаврук**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

lavruks@mail.ru

Методами численного моделирования исследованы течения гетерогенной детонации в смесях микро- и наночастиц алюминия в каналах с линейным расширением. Используется разработанная ранее полуэмпирическая модель детонационного горения микро- и наночастиц алюминия на основе приведенной кинетики с учетом переходного режима горения от диффузионного к кинетическому. Получены характеристики основных режимов распространения детонации: докритического, критического и закритического. Отмечены различия картин течения микродисперсных и нанодисперсных взвесей. Определены критические условия распространения и построены карты режимов в координатах критическая ширина канала – угол расширения.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610139-4).

## УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**К.А. Хохрякова[1], Е.В. Колесниченко[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

bca@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию устойчивости горизонтального слоя магнитной жидкости, расположенного на жидкой подложке из перфтороктана в ортогональном к поверхности переменном магнитном поле. Длина бегущей по поверхности слоя феррожидкости волны обратно пропорциональна частоте колебаний магнитного поля.При определенной частоте колебаний напряженности магнитного поля волна становятся стоячей.Получены зависимости критических значений амплитуды напряженности от частоты вынужденных колебаний переменного магнитного поля для слоя феррожидкости различной начальной толщины.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-590014.

## НОВЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ МЕГАВАТТНОМ ИНДУКЦИОННОМ ПЛАЗМОТРОНЕ ВГУ-3

**А.В. Чаплыгин, С.А. Васильевский, А.Н. Гордеев, А.Ф. Колесников**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

alchapl87@gmail.com

Исследован теплообмен в дозвуковых струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне ВГУ-3. Определены тепловые потоки к поверхностям меди, молибдена и ниобия в зависимости от подводимой мощности и давления в барокамере установки. Измерены скоростные напоры. Проведено численное моделирование одного из исследовавшихся режимов течения плазмы. Получены поля распределения температур по поверхности плоской панели из низкокаталитических теплозащитных плиток, установленной под углом атаки в потоке диссоциированного воздуха, истекающем из щелевого сопла с размерами выходного сечения 200х30 мм.

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А17-117021310383-2.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ-АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКЦИОННОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ С ВИХРЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПОТОКА

**Л.В. Шабарова[1], А.Д. Плехович[1], А.М. Кутьин[1], П.Г. Сенников[1], Р.А. Корнев[1], Ф.С. Пеплин[2]**

[1]*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН*

[2]*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

shabarova@ihps.nnov.ru

Предложена методика моделирования газодинамических условий получения порошкообразных материалов в ВЧИ-плазмохимическом реакторе. Модель включает турбулентное течение смеси идеальных вязких сжимаемых газов с учетом индуктивного нагрева и влияния электромагнитной силы на движение плазмы. Образование порошкообразных частиц реализуется в соответствии с результатами термодинамических расчетов плазмы, распределение частиц в потоке описывается механизмом диффузии. С использованием разработанной модели изучены процессы плазмохимического синтеза элементарного бора, кремния, и их карбидов в плазмотроне с вихревой стабилизацией потока. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-13-01027.

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СДВИГА СРЕДЫ НА ДИНАМИКУ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ОДНОРОДНОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**Д.А. Шаулов, А.А.Лощилов, М.Н. Ильичева, Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников**

*Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород*

poman99@mail.ru

Предложена новая упрощенная модель влияния импульсного воздействия на горящую пористую сплошную среду с учетом срыва части её массы, основанная на выделении энергии, мгновенном перемещении газовой фазы за счёт вытеснения продуктами импульсного воздействия. Учет доли срыва элементов пористого слоя осуществлялся на основе решения задачи аппроксимации. Выполнено численное моделирование на основе полученной модели.

## ОБ ОДНОМ МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК В ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

**Е.С. Шестаковская, Ю.М. Ковалев,Ф.Г. Магазов**

*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск*

leshest@list.ru

В данной работе представлены результаты математического моделирования механизма образования горячих точек при инициировании быстропротекающих процессов в гетерогенных взрывчатых веществах. Для замыкания законов сохранения массы, импульса и внутренней энергии было построено уравнение состояния конденсированного вещества в форме Ми – Грюнайзена. Анализ результатов, представленных в работе, показывает, что после выхода нестационарной ударной волны на поверхность пузырька газа в конденсированное взрывчатое вещество начинает распространяться встречная волна разрежения, которая может привести к нарушению сплошности материала и появлению отдельной микрочастицы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ФЕРРОКОЛЛОИДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ МЕТОДОМ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

**А.И. Шмырова, К.А. Хохрякова, А.В. Шмыров**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

lutsik@icmm.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования модифицированным методом капиллярных волн поверхностного натяжения коллоидного раствора магнетита в керосине, стабилизированного олеиновой кислотой, от величины напряженности однородного магнитного поля. Приведена зависимость поверхностного натяжения магнитной жидкости и жидкости основы от частоты возбуждения капиллярных волн в отсутствие и при наличии внешнего ортогонально направленного магнитного поля. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-41-590024.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

**А.А. Сайфутдинова [1], Б.А.Тимеркаев [1], А.И.Сайфутдинов [1]**

[1]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ, Казань*

as.uav@bk.ru

В работе сформулирована расширенная гидродинамическая модель, описывающая поверхностный диэлектрический разряд в воздухе. Были проведены предварительные численные расчеты, демонстрирующие формирование стримерной структуры разряда в случае приложения положительного потенциала к рабочему электроду. Представлена динамика электронной плотности и электрического потенциала для стримерной формы разряда.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-31-00098 и частично 18-43-160005.

## Подсекция II-5. МЕХАНИКА МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

### ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СНИЖЕНИЕМ ЗАГРЕЗНЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Э.Р. Абдеев, М.А. Лобанов, Э.И. Шавалеев,А.А. Рукомойников, М.В. Швецов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

air@bgutmo.ru

Предложен вариант повышения тепловой эффективности аппаратов воздушного охлаждения (АВО) за счет снижения загрязненностителлопередающей поверхности оребренных труб, оптимизацией потоков охлаждающего воздуха, выполнениемаппарата вертикально-цилиндрической конструкции. Данная конструкция позволяет решить множество проблем на всех этапах жизненного цикла, в том числе проблему повышения конкурентноспособности отечественных АВО, при решении вопросов утилизации техногенных нефтешламовых отходов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИNo 18-29-24178

### НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ СВЧ-ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ

**Э.Р. Абдеев[1], Р.И. Саитов[1], Р.Г. Абдеев[1], М.А. Фатыхов [2], А.Ф. Хасанова[2]**

*[1]Башкирский государственный университет, Уфа*

*[2]Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы г. Уфа*

air@bgutmo.ru

Предложена современная технология переработки нефтешламов на основе новых высокоэффективных методов и оборудования, которые обеспечат безопасность для окружающей среды и здоровья людей, а также исключат вышеперечисленные недостатки существующих технологий. Данная технология позволяет решить основные проблемы утилизации техногенных нефтешламовых отходов, а также существенно снизить объемы образующихся на нефтеперерабатывающих заводах отходов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 18-29-24178

### ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД К ТРЕХМЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ИССЛЕДОВАНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

**О.А. Абрамова, Ю.А. Питюк, Н.Б. Фаткуллина, А.З. Булатова**

*Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,*

*Башкирский государственный университет, Уфа*

bulatova29@yandex.ru

Работа посвящена численному изучению динамики дисперсных включений различных типов в объёме вязкой жидкости под действием сдвигового потока, а также расчёту реологических характеристик всей дисперсной системы в целом. Используемая численная методика основывается на методе граничных элементов, ускоренном с применением эффективных алгоритмов (быстрый метод мультиполей) и распараллеливания на гетерогенных вычислительных архитектурах (CPU+GPU). Описаны результаты моделирования и детали использования данного метода для расчёта относительной вязкости и компонент тензора напряжений различных типов дисперсных систем (эмульсии, суспензии, состоящие из частиц различных форм, пузырьковые жидкости).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-71-00068.

### УДАР ЖИДКОСТИ ПО ДНИЩУ ЦИЛИНДРА ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПРИМЫКАЮЩЕЙ К НЕМУ КАВИТАЦИОННОЙ ПОЛОСТИ

**А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, И.Н. Мустафин**

*Институт Механики и Машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН*

Ildarmn@mail.ru

Проведено численное моделирование удара жидкости по днищу цилиндрической емкости в условиях известных экспериментов по разрушению бутылки в результате удара по ее верхнему концу. Использовалась кусочно-постоянная аппроксимация ускорения днища, а кавитация частично заполняющего емкость столба жидкости у днища моделировалась одиночной кавитационной полостью в виде цилиндрического слоя между днищем и столбом жидкости. Показано, что влияние волн в столбе жидкости на его крупномасштабную динамику и удар по днищу емкости незначительно.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01135.

### О СНИЖЕНИИ ТРЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НАД СУПЕРГИДРОФОБНОЙ СТЕНКОЙ

**А.И. Агеев, А.Н. Осипцов**

*Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

aaiageev@mail.ru

В первой части работы с использованием метода граничных интегральных уравнений исследовано стоксово течение вязкой жидкости в микроканале с супергидрофобными стенками полосчатой структуры. Изучена зависимость сопротивления микроканала от

геометрических параметров текстуры стенок канала. Во второй части, с целью моделирования течения в вязком подслое турбулентного пограничного слоя над супергидрофобной поверхностью, проведены расчеты эффективного скольжения жидкости при сдвиговом течении над прямоугольной каверной, заполненной газом, при наложенных периодических колебаниях давления.
Работа выполнена по госбюджетному плану МГУ при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00057.

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВПОВЕРХНОСТЕЙ НА КОЛЕБАНИЯ ЗАЖАТОЙ КАПЛИ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**А.А. Алабужев, М.А. Кашина**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
ya.kashina-marina@yandex.ru

Исследуются вынужденные колебания капли жидкости под действием переменного электрического поля. Капля окружена другой жидкостью и ограничена в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердой пластиной – прямой. Рассматривается случай неоднородных поверхностей пластин – параметр Хокинга является периодической функцией координат и для каждой поверхности он разный. Электрическое поле создает внешнюю периодическую силу, которая действует на линию контакта. Скорость движения этой линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла от равновесного значения и скорости релаксационных процессов, частота которых равна удвоенной частоте электрического поля.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-42-04120.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В АЭРОЗОЛЬНОМ ОБЛАКЕ

**Д.В. Антонов[1], П.А. Стрижак[1]**
[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*
pavelspa@tpu.ru

Разработана методика регистрации условий, характеристик и последствий взаимодействия капель жидкостей в газовой среде. Выделены четыре режима взаимодействия: отскок, разлет, коагуляция, дробление. Построены карты режимов соударений с использованием чисел Вебера, Рейнольдса, Онезорге, Лапласа, капиллярности, безразмерных линейного и углового параметров взаимодействия.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10002.

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ДИНАМИКУ ЗАЖАТОЙ КАПЛИ В ВИБРАЦИОННОМ ПОЛЕ

**А.А. Алабужев, М.А. Кашина**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
alabuzhev@icmm.ru

Исследуется поведение капли жидкости в вибрационном поле с учетом движения линии контакта трех сред. Капля зажата между двумя параллельными пластинами, поверхности которых различаются, и окружена другой жидкостью. Скорость движения линии контакта пропорциональна углу отклонения. На всю систему в целом действует внешняя вибрационная сила, направленная параллельно или перпендикулярно пластинам. Получены зависимости частот собственных колебаний и декрементов затухания от параметров задачи. Построены амплитудно-частотные характеристики осесимметричных и трансляционных вынужденных колебаний, форма боковой поверхности капли и линии контакта.
Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## КОЛЕБАНИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА ЗАЖАТОГО МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ С РАЗЛИЧАЮЩИМИСЯ ПОВЕРХНОСТЯМИ

**А.А. Алабужев**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
alabuzhev@icmm.ru

Исследуются собственные и вынужденные осесимметричные колебания газового пузырька в поле пульсирующего давления. В равновесии пузырек имеет форму круглого цилиндра. Он ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми пластинами с различающимисяповерхностями и окружён несжимаемой жидкостью конечного объёма со свободной внешней поверхностью.Скорость движения линии контакта пропорциональна отклонению краевого угла.Получены зависимости частот собственных колебаний и декрементов затухания от параметров задачи. Обнаружен эффект пересечения мод колебаний. Построены амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний, форма боковой поверхности пузырька и линии контакта.

## КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ ТВЕРДЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ОСАЖДЕНИИ

**В.А. Архипов, С.А. Басалаев, А.С. Усанина**

*Томский государственный университет, Томск*

usaninaanna@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса гравитационного осаждения совокупности твердых сферических монодисперсных частиц в вязкой жидкости в области числа Рейнольдса $Re=10^{-3}\div1$. Определена качественная картина осаждения совокупности частиц в зависимости от начальной объемной концентрации системы частиц. Получены эмпирические зависимости коэффициента сопротивления системы частиц от числа Рейнольдса и начальной объемной концентрации совокупности частиц для исследованных режимов осаждения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-10014.

## MECHANICS IN ADVANCED MANUFACTURING: HOW TO MAKE THE TECHNOLOGY BETTER…

**Prof. Iskander Akhatov**

*Center for Design, Manufacturing and Materials (CDMM),*

*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

i.akhatov@skoltech.ru

In order to improve quality and reliability of parts and components and reduce manufacturing time of products, high-tech has been widely used in industry. In fact, the application of advanced manufacturing technologies drives the industry towards low power consumption, miniaturization, high precision, and multi-function. The presentation consists of two parts: In the first part, Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech) and Skoltech Center for Design, Manufacturing & Materials (CDMM) will be introduced. Key research & education areas that will be briefly outlined:Composite Materials and Structures (Manufacturing of Composites, Mechanical Testing and Characterization, Composites Modeling); Additive Manufacturing (3D Printing, Thermal Spraying); Digital Design (Product Lifecycle Management, Siemens PLM Digital Enterprise); Micro- and Nano- Mechanics.In the second part, several mechanical problems relevant to advanced manufacturing technologies will be presented: Aerosol Beam Direct-Write; Capillary-Based Printing; Resin Transfer Molding; Acoustic Wave Manipulation of Bubbly Liquids; Graphene Nanobubbles

## РАЗБРЫЗГИВАНИЕКАПЕЛЬ СУСПЕНЗИЙ ПРИ ИХ СТОЛКНОВЕНИИ С ТВЕРДЫМИ ПЛОСКИМИ ПОДЛОЖКАМИ

**И.К. Бакулин, В.Г. Гришаев, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов,*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

i.bakulin@skoltech.ru

В работе исследоваласьприменимость существующих критериев разбрызгивания для миллиметровых капель суспензий с 10-мкм частицами. Суспензии состояли из водного раствора глюкозы и гидрофильных частиц полистирола. Для данных суспензий были проверены критерий для чистой жидкости с эффективной вязкостью и критерий, основанный на энергетическом балансеотдельно вылетающих частиц. Ни один из критериев не смог правильно установить начало разбрызгивания. Анализ вылетающих фрагментов при разбрызгивании показал, что их характерный размер на порядок больше диаметра частиц. Учет размера вылетающих фрагментов и объемной доли частиц позволил корректно описать разбрызгивание рассматриваемых суспензий.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ СРЕДЕ

**К.И. Баширова**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

karina-bashirova@bk.ru

В работе вычислительными методами проводится моделирование ударной волны при взаимодействии с гранулированной средой. Используется решатель sonicFoam пакета OpenFOAM. Подготовлены одномерная и трехмерная модели, а также трехмерная модели с гранулированной средой. Для трехмерной модели гранулированная среда задается двумя моделями: посредством сетки, сгенерированной из stl-файла утилитой snappyHexMesh, а также в виде континуальной модели. Для последней в уравнение движения вводится сила межфазного взаимодействия и коэффициент объемного содержания. Полученные результаты сравниваются между собой. Показано существенное различие между одномерной и трехмерной моделями.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАНА ИЗ ГИДРАТНОГО МАССИВА ЗАКАЧКОЙ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

**С.В. Белова[1,2], О.В. Дударева [2], А.С. Чиглинцева[3,4]**

[1]*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, Стерлитамак*

[2]*Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск*

[3]*ИМех им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[4]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

svetlanav.86@mail.ru

Вработе представлена математическая модель извлечения метана из газогидратного массива, вследствие закачки жидкого диоксида углерода. Предполагается, что процесс восстановления метана происходит на подвижной фронтальной границе разделяющей

массив на две области. Ближняя область насыщена жидкой двуокисью углерода и ее гидратом, а дальняя область насыщенна метаном и его гидратом. Для осесимметричной задачи построены автомодельные решения, описывающие поля температур и давления. Исследовано влияние основных параметров на динамику рассматриваемого процесса.
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20001).

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВОДНЫХ ПЕНАХ И ВСКИПАЮЩИХ СТРУЯХ

**Р.Х. Болотнова, Э.Ф. Гайнуллина**
*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*
bolotnova@anrb.ru

С применением модифицированных решателей пакета OpenFOAMпроведено численноеисследование следующих процессов: формирования полой струи при истечении из тонкого сопла водяного пара сверхкритических параметров состояния и воздействия сферической воздушной ударнойволны на барьер из водной пены. Показано, что развитие вихревых зон влияет на образование полости внутри струи. Установлено затухание ударнойволныприеевзаимодействиисо слоем воднойпеныивыявленыпричины вихреобразования.
Работа частично поддержана грантами РФФИ (№ 17-41-020582 р_поволжье_а), Республики Башкортостан молодым ученым (№ 8 ГР 18.03.2019) и средствами государственного бюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

## РОЛЬ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРА В ГЕНЕРАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА НЕГО ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ С ЖИДКОСТЬЮ

**О.А. Власова, И.Э. Карпунин, М.Н. Соломенников**
*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*
vlasova_oa@pspu.ru, vankarpunin@yandex.ru, smn_108@mail.ru

Экспериментально изучается осредненная подъемная сила, действующая на тяжелый цилиндр в неравномерно вращающейся вокруг горизонтальной оси цилиндрической кюветы с жидкостью. Возникновение подъемной силы связано с азимутальными колебаниями тела вдоль границы полости. Показано, что тело совершает комбинированные колебания: азимутальные колебания вдоль границы полости синфазно с вращательными колебаниями вокруг своей оси. Обнаружено, что изменение момента инерции тела существенно влияет на величину генерируемой осредненной подъемной силы.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-00363.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ НЕФТИ ПРОМЫВНОЙ ВОДОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУЙНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СМЕСИТЕЛЕЙ

**Э.В. Галиакбарова**
*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*
emi.galiakbar@yandex.ru

Исследуется течение нефти, содержащей примеси глобул минерализованной воды, при встречном движении капель пресной воды большего радиуса, реализуемое в рабочей зоне струйного смесителя. Представлено теоретическое обоснование эффективной очистки нефти от частиц пластовой (соленой) воды, эмульгированных в нефти, промывной очищенной (пресной) водой.

## АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ С ГАЗОВЫМИ ЗАРОДЫШАМИ

**М.Н. Галимзянов [1], И.И. Вдовенко [2]**
[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*
[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*
monk@anrb.ru

В работе рассмотрено в плоскоодномерном и односкоростном приближении распространение малых возмущений в жидкости с пузырьками, заполненными паром и не растворимым в жидкой фазе газом. Из условия существования решения в виде затухающей бегущей волны выписано дисперсионное уравнение, проведены численные расчеты для воды с парогазовыми пузырьками. Исследованы особенности отражения гармонических волн от границы раздела "чистой" жидкости и жидкости с парогазовыми пузырьками. Проведен численный анализ влияния начального объемного газосодержания и изучено влияние частот возмущений и температуры среды на коэффициент затухания акустической волны.
Работа выполнена в рамках ГосЗадания № 0246-2019-0052.

## ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ СЛОЯ МНОГОФРАКЦИОННОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ

**Р.Н. Гафиятов**
*ИММ - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*
gafiyatov@mail.ru

Исследована задача об отражениикустической волны при разных углах падениячерез многослойную среду, содержащую слой многофракционной пузырьковой жидкости. Для смеси вода–пузырьковая жидкость–вода рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения волны.Показано влияние угла падения и параметров среды на исследуемые коэффициенты.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-000370 (мол_а).

## ЭЙЛЕРОВЫ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ТРАЕКТОРИЯМИ

**А.К. Гильфанов[1], Т.Ш. Зарипов[2]**

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

[2]*Университет Брайтона, Брайтон, Великобритания*

artur.gilfanov@kpfu.ru

Развит и реализован метод моментов для функции плотности распределения частиц по скоростям. Метод протестирован на случае одномерного и двумерного движения частиц в предположении высокого числа Кнудсена взвешенной фазы. Замыкание системы уравнений переноса моментов достигнуто за счет квадратурного представления функции плотности распределения в виде взвешенной суммы функций Дирака. Показана возможность метода моделировать пересечение траекторий частиц до трех различных скоростей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00387.

## ДИНАМИКА ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ПУЗЫРЬКОВОЙ СМЕСЬЮ, С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

**И.К. Гималтдинов, Е.Ю. Кочанова**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

moto8728@mail.ru

В работе численно исследуется распространение детонационных волн в цилиндрическом канале с внезапным расширением, заполненном пузырьковой жидкостью. Анализируются возможные сценарии динамики детонационных волн после их перехода в расширяющуюся часть канала. Установлено влияние объемного содержания горючего газа и геометрических параметров канала на распространение и срыв детонационной волны. Показано, что возможны два режима распространения детонации при переходе детонационной волны в расширяющуюся зону: непрерывное распространение детонации и срыв детонации.

## СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ПРИМЕСЬЮ НЕИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ НА ПЛОСКОЙ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЕ

**И.В. Голубкина**

*Институт механики МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва*

giv-mm@mail.ru

Построена математическая модель задачи остационарном продольном обтекании плоской теплоизолированной пластины сверхзвуковым потоком вязкого теплопроводного газа с примесью холодных капель. Рассматривается диапазон параметров течения, в котором испарением капель можно пренебречь, при этом учитывается, что внутри капель температура жидкости может быть существенно неоднородной. В результате численного моделирования найден диапазон определяющих параметров, в котором происходит заметное снижение температуры адиабатической стенки даже при очень малых исходных концентрациях капель.

Работа выполнена по плану госбюджетных работ НИИ механики.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ТОНКИМ ПУЗЫРЬКОВЫМ СЛОЕМ

**Д.А.Губайдуллин,А.А. Никифоров**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

anikiforov1@yandex.ru

Теоретическиисследовано взаимодействие акустических волн со стальной пластиной, покрытой тонким пузырьковым слоем. В рамках континуального подхода, с использованием разработаннойматематической модели динамики вязкоупругой пузырьковой среды получено дисперсионное соотношение. Выполнены расчеты коэффициентов отражения, прохождения и поглощения акустических волн при их взаимодействии с экранированной стальной пластиной. Полученные данные сопоставлены с экспериментальными данными, получено хорошее согласование.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-10016).

## ПАДЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МНОГОФРАКЦИОННОЙ ГАЗОВЗВЕСИ С ПОЛИДИСПЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

**Д.А. Губайдуллин, Р.Р. Зарипов**

*Институт механики и машиностроения РАН, Казань*

rinat_zaripov.imm@mail.ru

Рассмотрена задача о падении звуковой волны на границу многофракционной смеси газа с полидисперсными включениями. Представлена математическая модель, которая позволяет определять коэффициент отражения от границы рассматриваемой среды. Проанализировано влияние размеров включений на отражение акустической волны от границы трехфракционной смеси газа с каплями воды, частицами золы и алюминия.

Работа выполнена прифинансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-3497.2018.1).

## ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛОЙ ТРЕХМЕРНОЙ НЕСФЕРИЧНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

**А.И. Давлетшин**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

anas.davletshin@gmail.com

Рассматривается описание малой трехмерной несферичности газовых пузырьков при их гидродинамическом взаимодействии в рамках подхода, в котором отклонения от сферической формы представляются в виде ряда по сферическим функциям. Показано, что для характеристики трехмерной несферичности наиболее подходящим является отношение максимальной амплитуды суммарного по всем сферическим гармоникам отклонения поверхности пузырька от сферической к его радиусу. Приводятся результаты расчетов взаимодействия пузырьков, иллюстрирующих применение данной характеристики.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01135.

## МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ С ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ(ПОЧЕМУ НУЖНА ТЕХНОЛОГИЯ SUSPENSIONPLASMASPRAYING?

**С.С. Даутов, П.Г. Шорников,И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

s.dautov@skoltech.ru

В области газотермического напыления в настоящий момент не решена проблема нанесения порошков с размером фракций от десятков нанометров до нескольких микрометров. Малый размер частиц приводит к их недостаточному прогреву в процессе напыления и уносу их из области напыления периферийными потоками газа. Одним из способов формировать покрытие из мелкодисперсных порошков является распыление их суспензий на водной или этаноловой основе. Создание наноструктурированных материалов и покрытий является одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик узлов и деталей машин.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА АЭРОЗОЛЕМ

**О.Р. Дорняк, В.А. Шамаев**

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж*

ordornyak@mail.ru

На основе механики многофазных систем разработана математическая модель нестационарной адсорбции частиц аэродисперсной смеси на поверхности пористой матрицы. Анализ математической модели проведен для одномерного приближенияна примере аэрозольной пропитки древесины гидрофобным составом. Показано, что расчетные усредненные значения объемной концентрации осажденной жидкой компоненты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для различных значений начальной пористости древесины. Математическая модель позволяет прогнозировать динамику распределения по длине образца параметров процесса пропитки аэрозолем в зависимости от режимных характеристик и текстурных характеристик капиллярно-пористого материала

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА НА ОСНОВАНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО И ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Г.Г. Еникеев, Р.Р. Яныбаев, А.А. Касаткин**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

genikeev@gmail.com

Конструирование стойких против эрозии многослойных нано структурированных ионно плазменных покрытий лопаток компрессора ГТД сопровождается их сравнительными испытаниями при различных углах соударения. Испытания проводятся на специальных стендах подачей абразива на поверхность образцов с покрытиями и без них. Испытания проводятся в диапазоне углов $15^0 \ldots 90^0$. Вычислительный эксперимент движения двухфазной среды в межлопаточных каналах компрессора ГТД позволил конкретизировать диапазон углов соударения частиц о поверхность лопаток для различных условий эксплуатации. Эрозия, покрытия, испытания.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ МЕТОДОМ ПОГРУЖЕННОЙ ГРАНИЦЫ

**Д.В. Есипов, В.Н. Лапин, Д.С. Куранаков, Д.В. Чирков**

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

esipov@ict.sbras.ru

В настоящей работе методами математического моделирования исследуются течения вязкой несжимаемой жидкости с дисперсными частицами в плоском канале. Математическая модель состоит из уравнений Навье – Стокса и набора уравнений движения и вращения для каждой из частиц. Уравнения Навье – Стокса решаются методом SIMPLE, движение дисперсных частиц учитывается при помощи метода погруженной границы, набор уравнений движения и вращения частиц решается методом Рунге – Кутты. Разработанный численный метод верифицирован на ряде тестовых задач. С его помощью проведено моделирование дисперсных течений. Установлены осредненные профили скорости для различных значений параметров, определяющих течение: числа Рейнольдса, относительного диаметра частиц и объемной концентрацией частиц. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-71-20139).

## О РАСЧЕТЕ МНОГОМЕРНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ВАН ДЕР ВААЛЬСА С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В МОДЕЛИ ДИФФУЗНОГО ИНТЕРФЕЙСА

**Н.А. Зайцев[1,2], Б.В. Критский[1]**

[1]*Институт прикладной математики РАН, Москва*

[2]*Московский государственный университет, Москва*

nikolai_zaitsev@mail.ru

Разработан локальный разрывный метод Галеркина для расчета двухфазных многомерных течений однокомпонентных жидкостей в рамках модели диффузных интерфейсов с учетом капиллярных сил. Метод не требует отслеживания межфазных границ и позволяет рассчитывать монотонные в окрестности области межфазного интерфейса решения. Работоспособность метода продемонстрирована на задачах о движении изначально эллиптической капли и слиянии двух капель среды Ван дер Ваальса под действием капиллярных сил.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИКИ СТРУКТУРИРОВАННОГО КЛАСТЕРА ПУЗЫРЬКОВ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

**И.А. Зарафутдинов[1],Ю.А. Питюк[1], О.А. Абрамова[1]**

[1]*Башкирский государственный университет, Уфа*

ilnurzaraf2@gmail.com

В данной работе исследуется совместная трехмерная динамика пузырьков и твердых сферических частиц при наличии акустического поля в неограниченной идеальной несжимаемой жидкости. Данная задача представляет существенный интерес с практической точки зрения очистки поверхностей в микроэлектронике и пенной флотации. Для решения задачи был выбран трехмерный метод граничных элементов для потенциальных течений. Проведены расчеты и анализ динамики структурированного кластера, состоящего из нескольких пузырьков и частиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-71-00068.

## ОСАЖДЕНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ В ТРУБЕ В РЕЖИМЕ ПЕРЕХОДА К УДАРНЫМ ВОЛНАМ

**Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко, Л.Р.Шайдуллин**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

luda_tkachenko@inbox.ru

Экспериментально исследована динамика табачного дыма в трубах при резонансных колебаниях в режиме перехода к ударным волнам. В отсутствии колебаний дым находится в равновесии и естественное осаждение продолжается в течение долгого времени. При возбуждении колебаний этот процесс происходит в 10-100 раз быстрее. Обнаружена немонотонная зависимость времени осаждения от высоты заполнения дымом трубы с минимальным значением при заполнении закрытой трубы наполовину и с максимальным – при заполнении открытой трубы на три четверти. Это связано с формированием в трубе акустических течений в виде вихрей. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-10016).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ НА ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

**А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, А.И. Леонтьев, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин**

*НИИ механики МГУ, Москва*

zditovets@mail.ru

Известно, что в пограничном слое высокоскоростного газового потока с числом Прандтля отличным от единицы, образующемся при обтекании теплоизолированной поверхности, распределение полной энтальпии (температуры торможения) неравномерно, т.е. возникает эффект энергоразделения. В настоящей работе экспериментально исследуется влияние капель жидкости, образующейся в скачке конденсации, на эффект энергоразделения в пограничном слое. Интенсивность скачка конденсации варьируется как за счет изменения начальной относительной влажности потока, так и за счет изменения влагосодержания в потоке.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-19-00699.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖИДКОСТИ НА АДИАБАТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СТЕНКИ, ОБТЕКАЕМОЙ СВЕРХЗВУКОВЫМ ГАЗОКАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

**А.Г. Здитовец[1], С.С. Попович[1], Н.А. Киселёв[1], Ю.А. Виноградов[1], М.М. Стронгин[1], Н.В.Медвецкая[2]**

[1]*НИИ механики МГУ, Москва*

[2]*ОИВТ РАН, Москва*

zditovets@mail.ru

Приведены результаты измерения температуры поверхности пластины, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха. Работы проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке с закрытой рабочей частью.Два режима обтекания пластины сравнивались друг с другом. Первый – однофазный поток сухого воздуха, второй – воздушно-капельный поток, состоящий из смеси сухого воз-

духа и мелкодисперсных водных капель. Наличие капель в потоке приводило к изменению адиабатной температуры обтекаемой поверхности, которая регистрировалась тепловизором. Варьировались как начальная массовая концентрация капель, так и число Маха основного потока.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00130.

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО СТРАТИФИЦИРОВАННЫМ ПАРОВЫМ ВЗРЫВАМ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТИЧНЫХ АДИАБАТГЮГОНИО

**А.Ш. Исхаков[1], В.И. Мелихов[1,2], О.И. Мелихов[1,2], С.Е. Якуш[3], Лэ Чан Чунг[1]**
[1]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*
[2]*Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС», Электрогорск, Московская обл.*
[3]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
yakush@ipmnet.ru

Выполнен анализ недавних экспериментов по исследованию стратифицированных паровых взрывов с использованием так называемых частичных адиабат Гюгонио. Под последними понимаются кривые, которые получаются в результате решения соотношения Гюгонио, однако, в данном случае смягчается требование о полной фрагментации расплава и его перемешивания с охладителем путем введения соответствующих параметров. Показано удовлетворительное совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными по взрывному давлению и коэффициенту конверсии при использовании частичных адиабат.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00289.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ И ВЫДЕЛЕНИЯ РАСТВОРЕННОГО В ЖИДКОСТИ ГАЗА

**У. Ибен[1], А.В. Махнов[2, 3], А.А. Шмидт[2, 3]**
[1]*RobertBoschGmbH, CorporateResearch, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*
[3]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*
alexander.schmidt@mail.ioffe.ru

**Аннотация.** Потоки жидкости с областямипадения давления характеризуются возникновением и развитием кавитационных полостей в результате фазового перехода. Схлопывание таких полостей может генерировать волны сжатия. Подробная информация о распространениитих волн сжатия и о параметрах кавитационных течениймеет решающее значение для прогноза производительности промышленного оборудования в широком спектре приложений. Типичным примером подобных течений является течение в микро-канале под действием высокого перепада давлений. Такое течение и было исследовано в настоящей работе путем численного моделирования. Расчеты проводились на базе открытой вычислительной среды OpenFOAM.

## РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА, РАДИАЦИИ И КАПЕЛЬ В АТМОСФЕРНОМ СТОЛБЕ

**Б.Л. Канцырев**
*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва*
borisnkoc@ocean.ru

Представлены уравнения гидро- и термодинамики для моделирования атмосферного столба в условиях применимости безынерционного приближения Экмана. Рассмотрена замкнутая система уравнений переноса для прямой солнечной и пере-излучённой земной подстилающей поверхностью радиации совместно с уравнениями двухфазной гидро-и термодинамики, когда силы инерции малы в сравнении с силой тяжести. Представлены результаты, полученные в рамках модели, которые позволят интерпретировать индивидуальное влияние каждого из нескольких важных параметров задачи на состояние климата, понимаемого как характеристики атмосферы, осреднённые по длительному периоду времени (до нескольких десятков лет).

## ВИБРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

**И.Э. Карпунин[1], Н.В. Козлов [2]**
[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь,*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь,*
kozlov.n@icmm.ru, vankarpunin@yandex.ru

Экспериментально изучается влияние поступательных вибраций большой амплитуды на динамику двухфазной системы: лёгкого цилиндра в жидкости или двух несмешивающихся жидкостей, помещённых во вращающуюся цилиндрическую полость. Эксперименты проводятся при высокой скорости вращения, когда под действием центробежной силы легкая фаза располагается вблизи оси вращения. При этом частота вибраций близка к частоте вращения полости, их направление перпендикулярно оси её вращения. Показано, что при совпадении частот вибрации изменяют конфигурацию центробежного поля. В результате столб лёгкой фазы смещается стационарно во вращающейся системе отсчёта.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10053.

## ВИБРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ДВУЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКИМ КОНТРАСТОМ ВЯЗКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ

**И.Э. Карпунин[1], В.Г. Козлов [1], Н.В. Козлов [2]**

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь,*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь*

*vankarpunin@yandex.ru, kozlov@pspu.ru, kozlov.n@icmm.ru*

Экспериментально изучается динамика несмешивающихся жидкостей с большим контрастом вязкостей в цилиндрической ячейке Хеле-Шоу при высокочастотных колебаниях. Рассматривается радиальное пульсирующее течение с нулевым средним расходом. Экспериментально моделируется поведение вязких жидкостных включений в пористых средах, насыщенных маловязкой жидкостью, при высокочастотных колебаниях. Рассмотрены два случая: в первом вязкая капля обтекается радиальным пульсирующим потоком, во втором вязкая жидкость располагается в центре ячейки, при этом граница раздела совершает радиальные колебания. Обнаружено стабилизирующее действие на границу раздела.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-41-590773 р_а) и Правительства Пермского края (проект С-26/174.9)

## О ЗАСОРЕНИИ КАНАЛА МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПРИМЕСЬЮ С УЧЕТОМ ПРОСКАЛЬЗОВАНИЯ

**Л.С. Клименко[1,2], Б.С. Марышев[1,2]**

[1]*Институт механики сплошных средУрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

lyudmilaklimenko@gmail.com

Работа посвящена разработке модели, описывающей процессы осаждения частиц на стенку и закупорку микроканалов. Учет взаимодействия частиц с потоком производится в приближении Стокса. Задача решена численно с помощью метода случайных блужданий. При столкновении частиц со стенкой происходит слипание, что приводит к изменению формы стенок канала. Возникающие при этом вязкие напряжения могут привести к отрыву частицы. В модели также учтена возможность проскальзывания частиц вдоль стенки. Проанализирована эволюция концентрации осевших частиц, а также зависимость расхода через поперечное сечение капилляра от концентрации осевших частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-31-00297_мол_а) и Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕСНОГО МАССИВА СФЕРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

**Н.Л. Клиначева, Ю.М. Ковалев**

*Южно-Уральский государственный университет* (*научно-исследовательский университет*)*, Челябинск*

klinachevanl@susu.ru

Данная работа посвящена изучению разрушения лесного массива сферической ударной волной, сформировавшейся в результате падения космического тела на землю. Лесной массив представлен в виде гетерогенного слоя. Описываются результаты математического моделирования взаимодействия сферической ударной волны с гетерогенным слоем на основе полной системы уравнений Эйлера для двумерного случая в цилиндрических координатах. Исследовано влияние разрушения растительности на параметры ударной волны, а также силовое воздействие ударной волны на лесной массив.

## ВИБРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА СВОБОДНОГО ЯДРА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ С ЖИДКОСТЬЮ

**В.Г. Козлов[1], Н.В. Козлов [2], С.В.Субботин [1],**

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь*

kozlov@pspu.ru

Обобщаются результаты исследований осредненной динамики свободного ядра во вращающейся полости с жидкостью, колеблющегося под действием осциллирующей массовой силы. Рассматриваются полости и ядра разной геометрии, сферической и цилиндрической. Показано, что колебания ядра, которое располагаются в центре полости, приводят к его дифференциальному вращению и генерации осреднённых потоков в жидкости, структура которых определяется числом Экмана, а также безразмерными амплитудой и частотой колебаний ядра. В пространстве безразмерных параметров изучены структуры потоков, их устойчивость и границы смены режимов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10053.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЛИБРИРУЮЩЕМ ЦИЛИНДРЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ И СЫПУЧЕЙ СРЕДОЙ

**В.Г. Козлов, Д.А. Полежаев**

*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

polezhaev@pspu.ru

Экспериментально изучается устойчивость осесимметричной границы раздела между жидкостью и сыпучей средой в горизонтальном либрирующем цилиндре. Обнаружено, что межфазная граница неустойчива к появлению рельефа в виде регулярных холмов. Появление рельефа происходит при достижении критического значения числа Шильдса. В пределе больших амплитуд колебаний пространственный период рельефа определяется амплитудой и относительной частотой колебаний. Условия возникновения рельефа и его пространственный период изучены в зависимости от скорости вращения, частоты и амплитуды либраций, вязкости жидкости, размера частиц и диаметра цилиндра.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10053.

## НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОЙ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В ПОДОХЛАЖДАЕМОЙ СВЕРХУ ЖИДКОСТИ

**В.В. Коновалов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

konovalov@icmm.ru

Приближение смазки и одномодовая модель потенциального течения Лэйзера совместно адаптированы к проблеме подохлажденного пленочного кипения на горизонтальной поверхности плоского нагревателя. Определены условия сохранения устойчивого состояния с плоской межфазной поверхностью и отсутствующим дисбалансом теплового потока, идущего на фазовое превращение, а также характеристики разрушающих его возмущений. Подавление неустойчивости Рэлея-Тейлора фазовым переходом требует теплового потока, превышающего его критическую величину, которая является растущей функцией толщины паровой пленки. Определена зависимость критического теплового потока от начальной скорости возмущений границы раздела.

## ДИНАМИКА ВЗВЕСИ ПЕСКА В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ВИБРАЦИЙ

**Т.П. Любимова [1,2], О.О. Фатталов [2]**

*[1]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

*[2]Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

fattalov@mail.ru

Экспериментально исследована динамика взвеси частиц песка в вязкой жидкости, в полости, совершающей малоамплитудные высокочастотныегоризонтальные вибрации. Найдено, что возникающие под действием вибраций течения приводят к формированию периодическихструктур- слоевчастиц, ориентированных ортогонально направлению вибраций. При увеличении амплитуды вибраций наблюдаетсяувеличение расстояния между слоями, а при увеличении частоты вибраций пространственный период структур уменьшается. Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШИВАЕМОГО ВЫТЕСНЕНИЯ В КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБКАХ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОЛЯ

**Т.П. Любимова[1], С.А. Прокопьев[1], Т.Н. Загвозкин[1], А.М. Воробьев[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь*

[2]*Университет Саутгемптона, SO171BJ, Великобритания*

lubimova@psu.ru

Метод фазового поля используется для численного моделирования двухфазного течения двух смешиваемых жидкостей в капилляре. Капилляризначально заполнен одной жидкостью. Основное внимание уделяется случаю высоких капиллярных чисел, когда вытеснение жидкости происходит с образованием «пальцеобразного» мениска. Показано, что динамическое капиллярное давление является функцией средней скорости течения. Капиллярное давление замедляет течение в трубке. Профиль скорости остается параболическим вдали от мениска, а вблизи мениска генерируются небольшие завихрения, приводящие к возвратному движению жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00782.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В РАСТВОРАХ NaCl СТВЕРДЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ СМАЧИВАЕМОСТИ

**Т.П. Любимова [1,2], К.А Рыбкин[2], О.О. Фатталов [2], Л.О. Филиппов [1]**

*[1]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

*[2]Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

k.rybkin@gmail.com

В настоящей работе исследовановзаимодействие парогазовых пузырьков, образующихся в водных растворах NaClпод действием ультразвука (УЗ), с твердыми поверхностями различной степени смачиваемости. Вслучае твердой поверхности с углом смачивания

порядка 10° и дистиллированной воды (в отсутствие соли),при действии УЗ прикрепившиеся к твердой поверхности пузырьки перемещаются по ней, а при отключении УЗ большая их часть срывается с поверхности и всплывает. Однако,для той же поверхности, но в 20% водном растворе NaCl, при действии УЗ пузырьки, прикрепляются кповерхности и остаются неподвижными.
Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 17-41-590974 р_а) и Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СВЕРХСЖИМАЕМОСТИПРИРОДНОГО ГАЗА

**В.Л. Малышев, Е.Ф. Моисеева**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

victor.L.malyshev@gmail.com

В представленной работе приведен сравнительный анализ различных методов определения коэффициента сверхсжимаемости: на основе уравнений состояния, эмпирических корреляций и физического моделирования методом молекулярной динамки. Статистический анализ показывает, что метод молекулярной динамики демонстрирует минимальную ошибку равную 0.61% и лучше всего подходит для определения коэффициента сверхсжимаемости смесей с содержанием метана выше 90%, что характерно для большинства газовых месторождений. Для смесей с высоким содержанием диоксида углерода уравнение состояния Пенга-Робинсона с шифт-параметром показывает минимальную ошибку.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-79-10094.

## О ПЕРЕНОСЕ ПРИМЕСИ НАВЯЗАННЫМ ПОТОКОМ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ

**Б.С. Марышев[1,2], Л.С. Клименко[1,2]**

[1]*Институт механики сплошных средУрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

bmaryshev@mail.ru

Работа посвящена изучению транспорта растворенного вещества при течении смеси в канале. Поскольку скорость жидкости при таком течении очень неоднородна, перенос частиц примеси имеет нетривиальные свойства. Частицы растворенного вещества удерживаются возле стенок, что приводит к отставанию большого количества частиц от основного потока. В результате транспортный процесс может стать аномальным. Такие процессынаблюдаются в пористой среде. В настоящей работе мы показали, что медленное течение в вязком пограничном слое около стенки может быть причиной аномального переноса.
Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ МК-22.2019.1) и Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ МЕТОДОМ ОСИПЦОВА

**А.В. Мищенко[1,2], В.В. Измоденов [1,2,3]**

[1] *Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2] *Институт Космических Исследований РАН, Москва*

[3]*Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

a.v.mishch@gmail.com

В работе исследуется движение частиц пыли под действием электромагнитных сил, а также сил гравитации и радиационного давления Солнца. Целью исследования является поиск особенностей в распределении межзвездной пыли внутри гелиосферы. Представлено численное решение задачи методом Осипцова, который основан на решении уравнения неразрывности в лагранжевой форме вдоль траекторий частиц пыли. Найдено распределение пылевых каустик в гелиосфере и, в частности, в окрестности орбиты Земли.
Работа выполнена при поддержке гранта фонда «БАЗИС» № 18-1-1-22-1.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

**А.В. Мишин [1, 2]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет*

aleksey-mishin1994@gmail.com

В работе предлагается анализ вязкоупругих свойств системы жидкость – твердая фаза, базируясь на использованииряда гетерогенных моделей. На основе представленных особенностей фазудаетсяотследить влияние микроструктуры системы на коэффициенты переноса и возможность различного поведение фаз в процессе.

## МОДЕЛЬ СТОКСА-БРИНКМАНА ДЛЯ ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТЬ – ПОРИСТАЯ СРЕДА

**Е.В. Мосина, И.В. Чернышев**

*Волгоградский государственный университет, Волгоград*

mosina_ev@volsu.ru

Решена задача о медленном движении вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале, частично заполненном модельной пористой средой. Численно найдены микроскопические поля скорости и давления. В результате усреднения получены проницаемость пористой среды, скорость фильтрации,эффективная вязкость, скорость и касательное напряжениена пористой границе. Эти пара-

метры использованы в макроскопической модели Стокса-Бринкмана. Получено хорошее совпадение усредненных характеристик и профилей скорости с численными значениями. Также проведено сравнение с профилями скорости модели Стокса-Дарси.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-340015.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ЗВУКОПРОНИЦАЕМЫХ СФЕР

**Э.Ш. Насибуллаева**
*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*
elvira@anrb.ru

Проведено обобщение математической модели акустического рассеяния от сфер на случай звукопроницаемых сфер, центры которых расположены на одной оси, при воздействии монопольного источника излучения. Проведен численный параметрический анализ распределения давления внутри и вне сфер для различных значений их радиусов, физических характеристик внешней среды, числа сфер, расстояний между центрами сфер, расположения монопольного источника излучения. Показано, что при определенных значениях параметров возможно появление зон понижения или повышения давления за сферами.
Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию № 0246-2019-0052, гранта РФФИ (№ 17-41-020582-р_а) и АН РБ.

## КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЛАПСЕ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

**Р.И. Нигматулин [1,2], А.А. Аганин[1], Д.Ю. Топорков[1]**
[1]*Институт механики и машиностроения ФИЦКазанский научный центр РАН, Казань*
[2]*ФГБУ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*
aganin@kfti.knc.ru

Представлены результаты численного исследования особенностей кумуляции энергии при сферическом коллапсе паровых пузырьков в воде, ацетоне, бензоле и тетрадекане. В начале коллапсарадиус пузырьков 0.5 мм, пар в них находится в состоянии насыщения при давлении 10.3 бар, давление жидкостей 50бар. Показано, что в случае воды пар в пузырьке при коллапсе сжимается практически однородно, в случае ацетона в пузырьке возникают слабые волны сжатия, а в случае бензола и тетрадекана образуются радиально сходящиеся ударные волны. Наибольшая фокусировка энергии в центральной области пузырька достигается в случае тетрадекана.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01135.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ЛИНЕЙНЫМ ПРОФИЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

**А.Д. Низамова[1], В.Н. Киреев[2], С.Ф. Урманчеев[1]**
[1]*Институт механики им. Р.Р. МавлютоваУФИЦ РАН, Уфа*
[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*
adeshka@yandex.ru

В настоящей работе исследовано течение водного раствора пропиленгликоля (45%) в плоском канале с линейным профилем температуры. Рассмотрен некоторый диапазон изменения температуры, на котором зависимость вязкости жидкости аппроксимирована постоянной, линейной и экспоненциальной функциями. Найдены критические параметры смены режимы течения жидкости. Показано, что учет вида зависимости вязкости от температуры влияет на критические параметры смены режима течения. Исследованияа.Д. Низамовой и С.Ф. Урманчеева выполнены при финансовой поддержке Проекта «Гидродинамические эффекты в многофазных и термовязких средах при волновом и тепловом воздействии» (№ 0246-2019-0052).
Исследование В.Н. Киреева проводилось при частичной финансовой поддержке АН РБ иРоссийского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-41-020999-р_а).

## РЕЗОНАНСНАЯ КРИВАЯ ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГОРЕЗОНАТОРА

**П.П. Осипов [1], Р.Р. Насыров[1]**
[1]*Институт механики и машиностроенияФИЦ КНЦ РАН, Казань*
Nasyrov.ravil@bk.ru

Численно и аналитически исследована динамика вязкого политропного газа в закрытом прямоугольном резонаторе. Получено аналитическое решение для случая гармонических колебаний поршня на левой границе. На основе этого решения, а также на основе одномерных линейной и нелинейной моделей, рассчитаны резонансные кривые и проведено их сравнение. На основе нелинейной модели установлен частотный диапазон возникновения ударных волн в одномерном резонаторе. Показано, что линейная двумерная модель позволяет учесть конечность амплитуды давления в области резонанса и зависимость этой амплитуды от вязкости газа.
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-10016).

## ИТЕНСИФИКАЦИЯ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ В ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКАХ

**А.Н. Осипцов[1], И.В. Голубкина[1], А.И. Алексюк[2]**

[1]*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

osiptsov@imec.msu.ru

Обсуждаются два способа интенсификации «безмашинного» энергоразделения в потоке газа: (а) добавление примеси жидких капель в сверхзвуковой пограничный слой при энергоразделении по схеме А.И.Леонтьева; (б) использование колебаний потока для локального энергоразделения в мгновенных и осредненных полях течения. В случае (а) показано, что даже малая концентрация жидкой фазы приводит к резкому усилению энергоразделения. Способ (б) проиллюстрирован расчетами падения температуры на задней поверхности круглого цилиндра в потоке сжимаемого вязкого газа в режиме периодического схода вихрей.

Работа выполнена по госбюджетному плану МГУ при частичной поддержке гранта РНФ № 19-19-00234.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЬКА ВДОЛЬ СТЕНКИ

**Ю.А. Питюк, О.А. Абрамова, И.А. Зарафутдинов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

PityukYulia@gmail.com

В работе исследуется явление самодвижения пузырька, находящегося в контакте с твердой поверхностью. Данная задача представляет существенный интерес с практической точки зрения очистки микроповерхностей. Численная методика основана натрехмерном методе граничных элементов для потенциальных течений. Проведены расчеты и анализ поступательного движения пузырька с начальным возмущения двух соседних поверхностных секториальных мод, одна из которых попадет в резонанс 1-2 с объемной модой пузырька. Исследованы гидродинамические потоки, вызванные самодвижение пузырька.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00074.

## ЭФФЕКТ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАПИРАНИЯ ЭМУЛЬСИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

**А.А. Рахимов[1], А.А. Валиев[1], Р.Р. Асадуллин[2]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа*

ragar83@mail.ru

Представлены результаты экспериментов по течениюстабилизированных водонефтяных эмульсийс наличием анизотропных (хризотил) и изотропных (аэросил) частиц в цилиндрических капиллярах. Обнаружен рост вязкости эмульсии и уменьшение времени возникновения динамического запирания при увеличении содержания частиц.У эмульсий с хризотилом время наступления запирания и протекший объем до запирания на порядок меньше, чем у аналогичных эмульсий с аэросилом, при этом вязкость эмульсии с аэросилом даже выше, чем у эмульсии с хризотилом.

Исследование частично выполнено за счет средств государственного бюджета по госзаданию на 2019-2022 годы (№ 0246-2019-0052) и гранта РФФИ (№ 18-31-00360 мол_а).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ С ИСПАРЯЮЩИМИСЯ КАПЛЯМИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

**Р.Р. Салахов[1]**

[1]*Казанский федеральный университет, институт математики и механики, Казань*

ramms_92@mail.ru

Решена задача движения полидисперсного аэрозоля с испаряющимися каплями в струе внутри канала кругового сечения: модель струи аэрозольного ингалятора. Реализован эйлеров метод моментов для логарифмически нормальной функции распределения частиц по площадям поверхности. Для различных начальных значений насыщенности рассчитаны характеристики испаряющейся жидкой фазы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта (№ 18-31-00387).

## ОБЩАЯ МИКРОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ФЛЮИДНОЙ ЭКСТРАКЦИИ: ХАРАКТЕРНЫЕ МАСШТАБЫ ПРОЦЕССА

**А.А. Саламатин, А.Г. Егоров**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

arthur.salamatin2@gmail.com

Сформулирована микромасштабная модель извлечения масла из индивидуальной частицы молотого растительного сырья в условиях сверхкритической флюидной экстракции. Схематизация обобщает известные в литературе предельные модели, учитывает диффузионное сопротивление клеточных мембран и транспортных каналов. Идентифицированы два критерия подобия, $\Theta$ и M, характеризующие масличность сырья и сопротивление транспорту масла в частицах, соответственно. Проанализировано распределение концентрации целевых соединений по объему частицы при разных значениях критериев подобия. Получен главный член асимптотического разложения модели при $\Theta \to 0$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-160001 р_а.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПУЗЫРЬКА НА ПОВЕРХНОСТИ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**С.П. Саметов, А.И. Муллаянов, Ю.А. Питюк, И.А. Зарафутдинов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

sergey.sametov@gmail.com

Работапосвящена экспериментальному исследованию динамики пузырька, находящегося в контакте с твердой поверхностью с различной смачиваемостью, в сдвиговом потоке вязкой жидкости. Течение происходит при малых числах Рейнольдса в диапазоне 0,002 – 0,02.Измерены динамические контактные углы пузырька с твердой поверхностью.Собрана экспериментальная установка на основе оптически прозрачной ячейки, изготовленной из оргстекла. Проведена обработка поверхности пластины с целью изменения ее смачиваемости. Показано качественное различие поведения пузырька в сдвиговом потоке глицерина на поверхностях с гидрофильной и нейтральной смачиваемостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20102.

## ТЕЧЕНИЕ И РАСПАД ЗАКРУЧЕННОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУИ

**Г.М. Сисоев[1], Ю.Д. Шихмурзаев[2]**

[1]*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Университет Бирмингема, Бирмингем*

g.m.sisoev@imec.msu.ru

Рассматривается течение струи несжимаемой жидкости под действием центробежных сил, силы тяжести и поверхностного натяжения. Общая постановка задачи, помимо использования системы координат наблюдателя, включает две другие системы – криволинейную неортогональную систему координат, обобщающую цилидрическую на случай произвольно искривлённой цилинрической оси (‘базовой линии’), и базис Френе, меняющейся вдоль базовой линии. В случае тонкой струи выводится одномерная модель для описания траектории струи и основного течения. Полная постановка используется для анализа распространения линейных и нелинейных возмущений. Распад струи изучается с использованием соответствующих численных методов. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-01-00057 и грантаEPSRCEP/K028553/1.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛО-МАССООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ПУЗЫРЬКОВОМ РЕЖИМЕ КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ

**Б.А. Снигерев**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

snigerev@imm.knc.ru

Представлены результаты численного моделирования гидродинамики и тепло-массообмена при кипении недогретых жидкостей в условиях вынужденного течения. Математическая модель вскипания недогретой жидкости основана на дифференциальных уравнениях двухфазного течения, выведенных в рамках концепции взаимопроникающих континуумов, описывающих уравнения сохранения массы, количества движения и энергии фаз. Модель дополняется уравнениями, описывающими сопутствующие физические процессы(межфазный обмен количеством движения и энергией). Проведена верификация разработанной математической модели путем сравнения численных расчетов с литературными экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 19-01-000442.

## КОЛИЧЕСТВО НОВООБРАЗОВАНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ СОУДАРЕНИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ

**Я. Соломатин, П.А. Стрижак, Н.Е. Шлегель**

Национальный исследовательский Томский Политехнический университет, Россия

nik.shlegel.ask@gmail.com

Изучены процессы образования вторичных фрагментов при соударении друг с другом капель жидкости. Исследовано влияние скоростей движения и размеров исходных капель, угла атаки и безразмерных параметров взаимодействия на размеры образующихся вторичных фрагментов. По результатам экспериментов с группой жидкостных составов построены зависимости среднего радиуса образовавшихся при дроблении фрагментов от числа Вебера, скорости, размера капли, безразмерных параметров взаимодействия. Полученные данные имеют высокую практическую значимость при прогнозировании количества образующихся фрагментов.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-71-10002.

## ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД. МЕТОДЫ РАСЧЕТА.

**В.С. Суров**

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

surovvictor@gmail.com

Сиспользованием подхода Максвелла-Каттанео гиперболизированы уравнения гетерогенной среды в одно- и многоскоростном приближениях с релаксационными законами вязкости и теплопроводности. Для ряда сред учтено наличие фазовых превращений. Представлен многомерный метод Годунова с линеаризованным римановским решателем, а также многомерный узловой метод характеристик, базирующийся на расщеплении исходной системы уравнений на ряд одномерных подсистем, для расчета которых использован одномерный узловой метод характеристик. С помощью этих методов рассчитан ряд задач.

## СИЛЬНОЕ СЖАТИЕ ПАРА В КАВИТАЦИОННОМ ПУЗЫРЬКЕ В УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЯХ

**Д.Ю. Топорков**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН*

top.dmtr@gmail.com

Изучаются особенности сжатия среды в паровых пузырьках при их коллапсев ацетоне и бензоле. Температура жидкостей 293 К, а их давление варьируется в широких диапазонах.Проводится сопоставление со случаем сжатия пара в пузырьке, коллапсирующем в воде. При увеличении давления жидкости при коллапсе пузырьков во всех трех средах в их полости последовательно реализуются три сценария сжатия. Согласно первому сценарию сжатие происходит близким к однородному, во втором – с радиальным схождением изэнтропических волн, в третьем – с радиальным схождением ударных волн. Третий сценарий устанавливается, начиная с давления 0.25 бар в случае бензола, 2.5 бар в ацетоне и только с50 бар в случае воды.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01135.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА ПРОЦЕСС ЕЁ РАССЛОЕНИЯ

**Э.Р. Тухбатова,Ю.С. Замула,А.А. Мусин, В.И. Валиуллина**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

elmira.r.yakupova@gmail.com

Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование процесса расслоения водонефтяной эмульсии в прямоугольной вертикальной полости при возникновении свободноконвективных течений в жидкости при тепловом воздействии. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном лабораторном стенде. Численные алгоритмы реализованы в программном пакете OpenFOAM. Задача решена в диффузионном приближении с учетом тепловой конвекции в рассматриваемой среде. Показано влияние свободноконвективных течений на процесс оседания капель воды в водонефтяной эмульсии.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ МК-9398.2016.1 и РНФ 19-11-00298.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ РАЗДЕЛА ЧИСТОГО ГАЗА И ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ

**Д.А.Тукмаков[1,2]**

[1]*Институт механики и машиностроения - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КНИТУ-КАИ, Казань*

tukmakovda@imm.knc.ru

Численно моделировался процесс распространения прямого скачка уплотнения из газовзвеси в чистый газ. В качестве несущей среды рассматривались различные газы. Математическая модель учитывала межфазное силовое взаимодействие, а также межфазный теплообмен. Несущая среда описывалась как вязкий сжимаемый теплопроводный газ. Исследовалось влияние свойств газовой компоненты газовзвеси на процесс истечения запыленной среды в камеру низкого давления и на пространственное распределение температуры твердых частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантапрезидента Российской Федерации (грант МК-3497.2018.1).

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРОГАЗОВОГО ПОТОКА СО СЛОЕМ АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**С.Ф. Урманчеев[1], В.Н. Киреев[2]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

said52@mail.ru

Рассмотрена задача взаимодействия парогазового потока с поверхностью слоя аномально термовязкойжидкости в канале теплообменника. На основе результатов численного моделирования установлено, что в слое жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры формируется высоковязкая область, а на егоповерхности – устойчивое локализованное возвышение. Процесс осаждения паров на деформированную поверхностьслоя создаёт предпосылки для роста возвышения вплоть до перекрытия сечения канала. Динамика роста зависит отинтенсивности теплообмена и параметров кинетики осаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания 0246-2019-0052 и гранта РФФИ 17-41-020999-р_а

## ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ СЛОЯ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ

**Ю.В. Федоров**

*Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

kopperfildd@ya.ru

Представлена математическая модель, определяющая наклонное падение акустической волны на границу, а также слой газокапельной смеси или пузырьковой жидкости конечной толщины. Для случая падения низкочастотной акустической волны на границу раздела между чистым газом и газовзвесью, а также на границу между чистой и пузырьковой жидкостью установлены основные закономерности отражения и прохождения волны. Установлен диапазон изменения объемных содержаний капель, в котором возможно нулевое значение коэффициента отражения на низких частотах при наклонном падении волны. Представлено сравнение полученной теории с известными экспериментальными данными и, в частных случаях, с результатами других авторов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФМК-3497.2018.1.

## К ЗАДАЧЕ О ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ.

**З.Р. Хакимова**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

zulfya.hakimova@yandex.ru

Рассматривается динамика процесса снижения давления в резервуаре, заполненном жидкостью. Резервуар находится в грунте и имеет повреждения стенки. Построена теоретическая модель, описывающая изменение давления после гидравлического испытания объекта. Исследована зависимость темпа снижения давления от геометрических масштабов повреждения и от свойств жидкости и среды, окружающей резервуар.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-020244.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА С ЧАСТИЦАМИ ОКОЛО ТЕЛ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

**Ю.М. Циркунов [1], Д.А. Романюк [2], С.В. Панфилов, А.А. Веревкин**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

[1] yury-tsirkunov@rambler.ru, [2] romanyuk-da@rambler.ru

Представлены результаты численного моделирования обтекания тел до- и сверхзвуковым потоком запыленного газа. Течение несущего газа моделируется на основе уравнений Эйлера и Навье–Стокса, а течение дисперсной примеси методами Лагранжа и Монте-Карло. Анализируется роль эффектов случайной природы: столкновения между частицами, разброс частиц по размерам, рассеяние частиц несферической формы при отражении от обтекаемой поверхности. Исследуются картины течения и воздействие примеси на лобовую поверхность тела. На примере расчета двухфазного течения в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе обсуждаются трудности экспериментального изучения задач двухфазной аэродинамики.

## ВОЛНОВЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ

**И.Н. Черепанов, Б.Л. Смородин**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

cherepanov.in@psu.ru

Сформулированы условия применения приближения Буссинеска в задаче о конвекции коллоидного раствора, заполняющего ячейку, высота которой сравнима или больше длины седиментации. Определены границы линейной устойчивости и характеристики критических возмущений в зависимости от безразмерной длины седиментации. Изучена нелинейная эволюция конвективных течений. Обнаружен новый режим бегущей волны, в котором распределения концентрации и функции тока ангармоничны вдоль горизонтальной координаты. Построены бифуркационные диаграммы. В зависимости от параметров задачи конвекция может возникать в результате нормальной или обратной бифуркации. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-31-60074.

## К ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ МОНОЛИТА ГАЗОГИДРАТА

**А.С. Чиглинцева[1,2], М.Р. Давлетшина[2], В.Ш. Шагапов[1]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

changelina@rambler.ru

Решена задача о разрушении монолита газогидрата в воде, в котором газовое включение имеет сферическую и цилиндрическую форму, а также когда основная часть стенок включения представляет параллельные между собой полости. Получены распределения для основных параметров (давления и газосодержания) в полости гидрата. Установлена динамика движения границы фазовых переходов, сопровождаемых разложением газогидрата. Описаны температурные поля вблизи полости заполненной продуктами разложения газогидрата. Полученные результаты позволяют объяснить различный характер разрушения монолита газогидрата, который наблюдался в экспериментах на озере Байкал при его всплытии в воде.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**А.С. Чиглинцева[1,2], М.Р. Давлетшина[2], М.В. Столповский[2]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

changelina@rambler.ru

Решена задача о разложении газогидрата метана в пористой среде при при тепловом воздействии. Исследовано влияние различных параметров на скорость разложения гидрата, а также получена динамика движения границы фазовых переходов. Установлено, что энергия, высвобождаемая в результате горения метана, превосходит энергию, затраченную на его разложение, более чем в 5 раз.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА ПРИ НАГНЕТАНИИ ГАЗА В СНЕЖНЫЙ МАССИВ

**А.С. Чиглинцева[1,2], А.А. Русинов[3]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

[3]*Бирский филиал Башкирский государственный университет, Бирск*

changelina@rambler.ru

Построена математическая модель процесса образования гидрата в снежном массиве, в исходном состоянии насыщенном газом, при нагнетании этого же газа. Для осесимметричной задачи с протяженной областью фазовых переходов построены автомодельные решения, описывающие поля температур и давлений, а также насыщенностей снега, гидрата и газа в массиве. Изучено влияние массового расхода нагнетаемого газа, начальной снегонасыщенности и исходной температуры массива на протяженность объемной зоны образования гидрата в условиях отрицательной температуры, а также на величину температуры и гидратонасыщенности на границе, разделяющей ближнюю и промежуточную зоны.

## ВОЛНОВОДНЫЕ СВОЙСТВА ПАРОГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**В.Ш. Шагапов**

*Институт механики им.Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

shagapov@rambler.ru

Представлены результаты исследования по отражению и преломлению звука на границе раздела однофазной и двухфазной систем. Проведен анализ отражения и преломления звука при косом и прямом падении на границе раздела между воздухом и парогазокапельной системой. Изучены эффекты полного внутреннего отражения и полного прохождения на границе раздела рассмотренных систем.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕНОСА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПОТОКОМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

**Р.Р. Шарипов [1], Э.С. Батыршин[2]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

obter@yandex.ru

Данная работа посвящена экспериментальному изучению транспорта твердых частиц потоком вязкой жидкости в плоском канале. Перенос частиц сопровождается образованием осадка, в котором выделяются подвижный и неподвижный слои. Авторами сконструирована экспериментальная установка, позволяющая измерять реологические параметры тестируемых жидкостей и смесей, а так же визуализировать динамику частиц в потоке. Предложен способ обработки видеоизображений потока для оценки толщины подвижного слоя твердых частиц.

## ПОВЕДЕНИЕ СМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИЙ

**В. Шевцова, Ю. Гапоненко, В. Ясноу, А. Мяльдун**

*Свободный университет Брюсселя (ULB), Брюссель, Бельгия*

vshev@ulb.ac.be

Мы исследуем в наземных и микрогравитационных экспериментах необычное поведение интерфейса между двумя смешивающиеся жидкости с близкими (но не идентичными) вязкостями и плотностями при горизонтальной вибрации с частотой менее 25 Гц. В гравитационном поле пространственно-периодическая пилообразная замороженная структура создается на интерфейсе. Напротив, при низкой гравитации в условиях параболического полета, долгоживущий паттерн состоит из ряда вертикальных колонн чередующихся жидкостей. Сравнение наблюдений показало, что уменьшение силы тяжести способствует выбору моды с меньшим волновым числом, и кроме того, гравитация устраняет длинноволновые возмущения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЕНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

**Н.Д. Шмакова[1], Н.А. Пеньковская[1], А. Пуисто[2], Е.В. Ерманюк[1], С. Сантуччи[1,3]**
[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*
[2]*Aalto University, Хельсинки*
[3]*École normale supérieure de Lyon, Лион*
shmakova@hydro.nsc.ru

Представлено экспериментальное исследование течения жидкой пены, состоящей из монослоя миллиметровых пузырьковс постоянной скоростью потока, при наличии проницаемого препятствия. Для моделирования простейшей гетерогенной среды используется ячейка Хеле-Шоу. Одиночный дефект локализован в середине ячейки, уменьшая ее локальную проницаемость. Исследуется влияние геометрических свойств дефекта (высота, ширина, форма) на средний устойчивый поток пены. С точки зрения течения пены, мы можем наблюдать четкую рециркуляцию вокруг препятствия, характеризованную квадророльным полем скоростей с отрицательной волной на препятствии, интенсивность которых развивается систематически с высотой препятствия.
Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 14.W03.31.0002.

## ЦИФРОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА МЕЖФАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**А.И. Шмырова, И.А. Мизёва, А.В. Шмыров**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
lutsik@icmm.ru

Представлены результаты применения цифровой интерферометрии для регистрации характеристик бегущих капиллярных волн на межфазной поверхности и прецизионных измерений радиуса кривизны осесимметричного мениска. Интерференционнаярегистрация профиля поверхности и полевой метод обработки изображения расширяют возможности метода капиллярных волн и повышают точность определяемых параметров. Кроме того,подобное восстановление профиля поверхности открывает возможность использовать отдельные фрагменты поверхности для тензиометрических измерений.
Работа выполнена при поддержке РФФИ и правительства Пермского края (грант РФФИ № 17-41-590095,Программа поддержки Научных школ № С-26/788).

## КОЛЕБАНИЯ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПОЛОСТИ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ПОСТУПАТЕЛЬНЫЕ ВИБРАЦИИ

**В.Д. Щипицын[1], Г.М. Лебедева [1], Ю.Р. Мавлютова [1]**
[1]*Лаборатория вибрационной гидромеханики,*
*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*
schipitsyn@pspu.ru

Экспериментально исследована вибрационная динамика твердого неосесимметричного тела в форме эллиптического цилиндра в заполненной вязкой несжимаемой жидкостью прямоугольной полости, совершающей гармонические поступательные вибрации. Опыты выполнены с телом, плотность которого больше плотности жидкости. Посредством скоростной видеорегистрации процесса с его дальнейшей покадровой обработкой исследован характер взаимодействия эллиптического цилиндра с дном полости, а также характер его поступательных и вращательных колебаний. Обнаружены и изучены различные режимы колебаний тела для его характерных положений в полости при вибрациях.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-00122.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ СО ВЗВЕШЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

**Р.Р. Юлмухаметова, Ю.С. Замула, А.А. Мусин, А.В. Гимадеев**
*Башкирский государственный университет, Уфа*
Regina.you@mail.ru

В работе рассматривается ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости со взвешенными сферическими частицами в канале прямоугольного сечения. Проводится физическое и математическое моделирование исследуемых процессов. Физическая модель представляет собой вертикальный канал прямоугольного сечения, в который закачивается жидкость с твердыми частицами. Математическая модель записана в диффузионном приближениис учетом действия на частицы гравитационных сил и включает систему уравнений Навье-Стокса, неразрывности и диффузии. Исследуется влияние параметров системы на динамику распределения частиц в потоке.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-11-00298.

# ДИНАМИКА ВЗВЕСИ ПЕСКА В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ВИБРАЦИЙ

**Т.П. Любимова [1,2], О.О. Фатталов [2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

fattalov@mail.ru

Экспериментально исследована динамика взвеси частиц песка в вязкой жидкости, в полости, совершающей малоамплитудные высокочастотныегоризонтальные вибрации. Найдено, что возникающие под действием вибраций течения приводят к формированию периодическихструктур- слоевчастиц, ориентированных ортогонально направлению вибраций. При увеличении амплитуды вибраций наблюдаетсяувеличение расстояния между слоями, а при увеличении частоты вибраций пространственный период структур уменьшается.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## Подсекция II-6. ПРОБЛЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ

### ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СРЕДАХ С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

**И.Н. Абдулин[1], В.А.Байков[1,2]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет,научно-исследовательская лаборатория «Групповой анализ математических моделей естествознания, техники и технологий», Уфа*

[2]*ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа*

nakiullovich@mail.ru

Рассмотрены начально-краевые задачи для одномерной однофазной модели движения жидкости в пористой среде, с функцией проницаемости, равной конечной реализации канторовой лестницы и степенной зависимости от пространственной координаты.Показано, что минимум нормы разности решений с такими функциями проницаемости достигается при достижении минимума нормы разности функций проницаемости. Рассмотрены аналогичные задачи, в которых вместо канторовой лестницы взята ступенчато-степенная функция.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1.3103.2017/4.6).

### ФИЛЬТРАЦИЯ В ЗАЛЕЖИ ФУНДАМЕНТА И ДИНАМИКА ЗАВОДНЁННЫХ ЗОН

**М.Г. Алишаев**

*Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, Махачкала*

alishaev@rambler.ru

Обсуждаются вопросы оседания и растекания вод, нагнетаемых в мощную однородную залежь нефти. Предлагаются новые постановки задач и инженерные оценки. Отмечается актуальность исследования сегрегации фаз в пористой и трещиноватой среде в связи с увеличением глубин бурения и открытием крупных залежей нефти в материнских породах фундамента, ниже толщи осадочных пород. Такие залежи эксплуатируются во Вьетнаме и открыты на Каспии.

### ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЕ ГРП, ИНИЦИИРУЕМЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ

**Е.П. Аносова**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

ae0809@mail.ru

Рассматривается задача о распространении низкочастотных гармонических волн давления в трещине, расположенной перпендикулярно к горизонтальной скважине в пористой и проницаемой среде. Проанализировано влияние коллекторских характеристик пласта и трещины (например, их проницаемости, ширины трещины). Установлено, что при распространении волн по радиальным трещинам характерные расстояния затухания могут быть значительно больше по сравнению со случаем, когда трещина отсутствует.

### НЕРАВНОВЕСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОБЛЕМАХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

**А.А. Афанасьев[1], Д.Р. Халитова[2], С.А. Халявин[2], В.К. Сагандыкова[2], Г.И. Воробьев[2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

afanasyev@imec.msu.ru

Доклад содержит обзор результатов исследования фильтрации в трещиновато-пористых средах с учётом теплопроводности, капиллярных сил и неравновесного тепломассообмена между трещинами и вмещающей их низкопроницаемой пористой средой. Решенаклассическая в теории фильтрации задача Баклея-Леверетта, обобщенная на случай двухфазных течений в трещиновато-пористых средах. В рамках модели двойной пористости исследована гидродинамическая устойчивость фронтов вытеснения, структура температурных фронтов и свободная конвекция в трещиновато-пористой среде. Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ(МД-3567.2018.1).

### ОБ УЧЕТЕ ИСПАРЕНИЯ ИЛИ ИНФИЛЬТРАЦИИ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ

**Э.Н. Береславский, Л.М. Дудина**

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

eduber@mail.ru, liliya_shuvalova@mail.ru

Исследуются следующие фильтрационные течения с неизвестными свободными границами:

– при обтекании шпунта Жуковского в случае, когда слой грунта подстилается на всем своем протяжении непроницаемым основанием и происходит испарение со свободной поверхности;

– при обтекании шпунта Жуковского в случае, когда нижележащий пласт представляет собой целиком хорошо проницаемый водоносный горизонт и происходит инфильтрация на свободную поверхность;

– при движении грунтовых вод в прямоугольной перемычке с частично непроницаемой вертикальной стенкой при наличии испарения со свободной поверхности;
– при движении грунтовых вод к несовершенной галерее при наличии испарения со свободной поверхности.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ В РАМКАХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

**Э.А. Бондарев, И.И. Рожин, К.К. Аргунова**

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск*

bondarev@ipng.ysn.ru

Предложен метод оценки возможности создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Он основан на использовании математической модели многофазной неизотермической фильтрации несовершенного газа и воды, в которой химическая реакция гидратообразования происходит при температуре, существенно зависящей от давления газа. Изучена динамика распределения гидратонасыщенности, водонасыщенности, давления и температуры в выбранном пласте, который характеризуется пористостью, проницаемостью, начальными значениями давления, температуры и водонасыщенности. Расчеты показали, что конечный результат сильно зависит от сочетания пористости и проницаемости пласта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Саха (Якутия) № 18-45-140035 р_а.

## НЕУСТОЙЧИВОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ ПРИ ПОСТОЯННОМ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЯ И ЗАДАННОМ РАСХОДЕ

**А.А. Валиев[1], А.Т. Ахметов[1,2]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

azatphysic@mail.ru

Результаты экспериментов по неустойчивому вытеснению из прозрачной ячейки Хеле-Шоу при постоянном перепаде давления и заданном расходе сравниваются по форме образующихся структур, фрактальной размерности и коэффициенту вытеснения, как до прорыва, так и после прорыва. Установлено, что при одинаковых объемах закачки большие градиенты давления приводят к более эффективному вытеснению.

Исследование частично выполнено за счет средств государственного бюджета по госзаданию на 2019-2022 годы (№0246-2019-0052) и гранта РФФИ (№ 18-31-00360 мол_а).

## СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РАДИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ДРОБНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ОПЕРАТОРОМ ПО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

**Р.К. Газизов[1,2], С.Ю. Лукащук[2]**

[1]*ООО «РН-УфаНИПИнефть, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[1]gazizovrk@gmail.com, [2]lsu@ugatu.su

Рассматриваются модификации закона Дарси для случая плоской радиальной фильтрации, полученные с использованием различных операторов дробного интегро-дифференцирования по пространственной переменной: левосторонних операторов Римана–Лиувилля и Герасимова–Капуто, потенциала Рисса, дробной степени оператора Лапласа. Для соответствующего дробно-дифференциального уравнения фильтрации решается задача структурной идентификации, состоящая в определении типа дробного оператора, обеспечивающего получение физически корректного установившегося распределения давления в задачео притоке к скважине.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 1.3103.2017/4.6.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**Д.Р.Газизова[1,2], М.В. Михайлюк[2]**

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

[2]*Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследованийРоссийской Академии Наук»*

gazizova-diana@mail.ru

Рассматривается численное моделирование процесса вытеснения вязкой жидкости из пористой среды с учетом капиллярных эффектов. В каждый момент времени рассчитывается площадь поверхности межфазной границы. Исследуется влияние различных параметров на изменение площади межфазной границы. Приводится описание экспериментов по вытеснению модели нефти водой из неокомских песчаников. Экспериментальные данные сравниваются с результатами численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-15099 офи_м.

## ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВЫСОКОВЯЗКУЮ НЕФТЬ В ПЛАСТЕ С ПОМОЩЬЮ ПАРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН РАБОТАЮЩИХ ОДНОВРЕМЕННО

**А.А.Гиззатуллина**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

alina.gizzatullina87@mail.ru

Представлена и исследована математическая модель фильтрации высоковязкой нефти в пласте с применением теплового воздействия через одну горизонтальную скважину или систему скважин, проанализированы затраты тепла на прогревание нефтяного пласта, эволюция дебита нефти и масса откачанной нефти за рассматриваемый период времени. Полученные результаты могут внести важный вклад в создание и совершенствование программных средств моделирования разработки месторождний тяжелой нефти. Результаты могут быть использованы для выбора наиболее эффективной стратегии нефтедобычи на таких месторождениях.

## РАСЧЕТЫ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ СО СЛУЧАЙНЫМИ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЯМИ

**А.С. Губкин, Д.Е. Игошин, А.А. Губайдуллин**

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень*

igoshinde@gmail.com

Предложена модель пористой среды со случайными микронеоднородностями, скелет которой формируется по следующему алгоритму: в область в форме прямоугольного параллелепипеда случайным образом размещаются шары при заданных минимальной степени перекрытия шаров и минимальной ширине поровых каналов. Проведена серия расчетов стационарного течения вязкой несжимаемой жидкости при различных параметрах модели. Геометрия порового пространства и расчетные сетки созданы в пакете Salome, гидродинамические расчеты выполнены в пакете OpenFOAM. По результатам расчетов на основе уравнения Дарси найдены проницаемости среды при заданных пористостях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-15119.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ТЕСТА В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПЛАСТАХ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ВЫШЕ МИНИМАЛЬНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**А.Я. Давлетбаев[1], З.С. Мухаметова [2]**

[1]*Башкирский государственный университет, Уфа*

[2]*Уфимский государственный технический нефтяной университет, Уфа*

DavletbaevAY@rambler.ru

В работе обсуждаются результаты численного моделирования закачки жидкости в скважину с давлением, превышающим минимальное горизонтальное напряжение. Развитие трещины в низкопроницаемом пласте происходит по модели Перкинса-Керна-Нордгрена. Утечки жидкости через поверхность трещины с пластом осуществляются по закону Дарси, учитывается взаимовлияние утечек жидкости вдоль трещины по соседним ячейкам численной модели.

**3**

## К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ОСЕДАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ДРЕНАЖНЫХ УСТРОЙСТВ

**В.И. Дорофеева**

*ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С.Тургенева», Орел*

vdorofey@mail.ru

Исследуется математическая модель двумерного процесса опускания уровня грунтовых вод.Численно, методом дискретных особенностей, исследуется влияние полупроницаемых включений произвольной формы на процесс оседания грунтовых вод под действием силы тяжести и при наличии дренажного устройства. Приводятся примеры решения задач для случая двух полупроницаемых включений.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

**О.В. Дударева**

*Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск*

BelovaOlgaV@mail.ru

По предложенному ранее нелинейному закону фильтрации с предельным градиентом давления численно решены задачигидродинамических исследований скважин, при переменных режимах ее работы. Установлено, что по результатам гидродинамических исследований скважин, возможно выявлять наличие нелинейных эффектов фильтрации. Соответствующие формы кривых восстановления давления при переходных режимах ее работы, дают возможность судить о коллекторских характеристиках пласта, а также качественно и количественно выявлять степень отклонения закона фильтрации от линейного закона Дарси.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ОСЦИЛЛЯЦИОННОГО ГИДРОПРОСЛУШИВАНИЯ НА ОБРАЗЦЕ

**А.В. Жонин[1], Ю.В. Мартынова[1], С.П. Саметов[2],Э.С. Батыршин[2],**

*[1]ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа*

*[1]ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа*

martynovayv@ufanipi.ru

В работе рассматривается экспериментальная методика для определения фильтрационных свойств горных пород, основанная на принципе гидропрослушивания при периодически изменяющемся давлении. При решении обратной задачи восстанавливается коэффициент пьезопроводности для случая линейной фильтрации и зависимость коэффициентапьезопроводности от градиента давления для случая аномальной фильтрации.

## ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИРОДНОГО ПЕСЧАНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕЖФАЗНЫХ НАТЯЖЕНИЯХ

**Т.Р. Закиров**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

tirzakirov@kpfu.ru

В работе исследуется влияния межфазного натяжения на двухфазные течения в пористой среде. Вычислительные эксперименты проводятся в трехмерной цифровой микротомографической модели песчаника при помощи решеточных уравнений Больцмана и модели градиента цветового поля. Получены результаты, согласно которым рост межфазного натяжения способствует увеличению эффективности вытеснения смачивающей жидкости, зафиксированной на момент прорыва нагнетаемой фазы, и уменьшению эффективности после ее прорыва. Увеличение межфазного натяжения способствует переходу течения с формированием вязких пальцев к потоку с формированием капиллярных пальцев. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00134.

## ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

**Д.Е. Игошин, А.С. Губкин, А.А. Губайдуллин**

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень*

igoshinde@gmail.com

Предложена модель пористой среды периодической структуры со скелетом из шаровых сегментов на основе ромбоэдрической системы решетки. Проведена серия вычислительных экспериментов по фильтрации двухфазной вязкой несжимаемой жидкости при различных параметрах модели. Геометрия порового пространства и расчетные сетки созданы в открытом пакете Salome, гидродинамические расчеты выполнены в открытом пакете OpenFOAM. Результаты вычислительных экспериментов использованы для нахождения на основе уравнения Дарси относительных фазовых проницаемостей при различных пористостях и насыщенностях фаз. Выполнен анализ полученных данных. Работа выполнена при поддержке грантаРФФИ № 16-29-15119.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПОСЛЕ ГИДРОУДАРА

**А.М. Ильясов**

*ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа*

amilyasov67@gmail.com

В работе предложена математическая модель, описывающая изменение давления в трещине ГРП после остановки закачки жидкости гидроразрыва и учитывающая потери на трение в призабойной зоне скважины вследствие искривления траектории трещины и наличия перфорационных отверстий. Получено аналитическое решение для давления в трещине ГРП после остановки закачки жидкости гидроразрыва при монотонном и колебательном режимах течения в трещине, а также аналитические выражение для падения давления в призабойной зоне скважины. Выполнена параметрическая «прогонка» полученного решения по входным данным задачи.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙНЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙФИЛЬТРАЦИИ ВНЕОДНОРОДНОМ НЕФТЯНОМПЛАСТЕ СУЧЕТОМБАРОТЕРМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

**Д.Ф. Исламов, А.Ш. Рамазанов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

islamovden@rambler.ru

Современные технологии мониторинга разработки нефтяных месторождений позволяют регистрировать нестационарную температуру с высоким разрешением в любой точке вдоль ствола скважины. Кроме того, поскольку процесс изменения температуры протекает значительно медленнее, чем у давления, данный метод привлекателен с точки зрения оценки параметров прискважинной зоны пласта. С использованием замеров температуры возможно оценить проницаемость и радиус призабойной зоны. В рамках данной работы разработана и исследована численная модель двумерной нестационарной фильтрации жидкости в неоднородном по проницаемости пласте.

## ВЛИЯНИЕ УПАКОВКИ ГРАНУЛ КОМПОЗИТНОГО СОРБЕНТА НА СОРБЦИОННУЮ ЕМКОСТЬ

**И.В. Казанин, В.Н. Зиновьев, В. А. Лебига, А. Ю. Пак, А.С. Верещагин, В.М. Фомин**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

kazaniniv@gmail.com

В работе проводится экспериментальное и теоретическое исследование влияния упаковки гранул, сформированнойв результате произвольной засыпки композитного сорбента в виде цилиндрических гранул в адсорбер, на его сорбционную емкость по отношению к целевому компоненту (в нашем случае гелию). Проведено сравнение сорбционной емкости для случайной упаковки гранул сорбента, полученной в экспериментах, с его расчетным и оптимальным упорядоченным значениями вариантов упаковки. Показано, что упорядоченная упаковка цилиндрических гранул композитного сорбента в адсорбере приводит к увеличению его сорбционной емкости более чем в 2 раза относительно случайной упаковки гранул сорбента.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ СВОЙСТВ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДОВ В ПЛАСТАХ-КОЛЛЕКТОРАХ

**М.Ф. Каримов[1], А.Г. Латыпов[2]**

[1]*Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

aglat52@mail.ru

Рассматриваются вопросы физико-химической механики проявления свойств неравновесности газожидкостных дисперсных систем в пористой среде и в свободном объеме, а также практические аспекты использования указанных свойств для интенсификации нефтегазодобычи. Показано, что введение примесей поверхностно-активных веществ в газожидкостные дисперсные системы, насыщающие пористую среду, наряду с созданием определенных гидродинамических условий их генерирования, инициируют развитие в динамических условиях неравновесных сорбционных и диффузионных процессов на границе раздела фаз (ламеллах), которые приводят к проявлению в дисперсных системах кинетических эффектов и приобретению такими системами макроскопических вязкоупругих свойств, способствующих стабилизации фронта вытеснения флюидов в слоисто-неоднородных пористых средах и, как следствие, повышению компонентоотдачи пласта.

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ СЕТКИ ВОРОНОГО ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ

**Т.Ф. Киреев[1,2], Г.Т. Булгакова[2]**

[1]*Уфимский научно-технический центр, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

kireevtf@mail.ru

В работе рассмотрена сетка Вороного для решения нескольких задач фильтрации методом конечных объемов. Исследованы преимущества этой сетки перед некоторыми другими неструктурированными сетками. Показано, что применение околоскважинного апскейлинга проводимости существенно повышает точность решения задачи двухфазной фильтрации на грубой сетке Вороного. Предложен метод интерпретации трассерных исследований с помощью точного описания геометрии естественных высокопроницаемых трещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-020226-р_а.

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ВИБРОКОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПОДОГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ СИСТЕМЫ БИНАРНЫЙ РАСТВОР – ПОРИСТАЯ СРЕДА

**Е.А. Колчанова[1, 2], Н.В. Колчанов[2]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

kolchanovaea@gmail.com

Изучаются осредненные конвективные течения, возникающие в неоднородной по температуре и концентрации бинарной жидкости под действием вертикальных вибраций. Жидкость заполняет горизонтальный слой, разделенный на две части пористой средой. Среда подогревается снизу в поле силы тяжести. Численно определены структуры течения разной длины волны и их эволюция с ростом вибрационного параметра и концентрационного числа Релея-Дарсив области небольших надкритичностей. Найдено, что при малых вибрационных параметрах течение локализуется в слое жидкости над пористой средой.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ С МИКРО- И НАНОЧАСТИЦАМИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

**В.В. Кузнецов, С.В. Димов**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

vladkuz@itp.nsc.ru

В статье рассмотрена фильтрация суспензии водоглицеринового раствора с алюмосиликатными микрочастицами и наносуспензии этиленгликоля с $SiO_2$ через пористый образец, образованный слоемуплотненных микросфер. Получены данные о снижении проницаемости для различных градиентов давления и обсуждены особенности удержания микро- и наночастиц. Установлено, что наночастицы могут переноситься через пористый образец и механизмом их удержания является обратимая адсорбция на стенках пор. Обратимый механизм удержания наночастиц подтверждается снижением равновесной проницаемости приувеличении градиента давления.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А18-118112790037-0).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СКВАЖИНЫ В АНИЗОТРОПНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ СО СТЕПЕННЫМ ЗАКОНОМ ПРОНИЦАЕМОСТИ

**Д.Г. Лекомцев**

*Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел*

lekomtcevdg@yandex.ru

Изучается плоскопараллельная задача о дебите скважин в анизотропном неоднородном пласте грунта с раздельной анизотропией и неоднородностью. Проницаемость грунта моделируется тензором второго ранга. Исследование проводится в случае совершенной скважины. Скважина расположена в грунте со степенным законом изменения проницаемости. Рассмотрен случай, когда показатель степени целое положительное четное число. Данный частный случай допускает аналитическое решение. Исследовано влияние анизотропии и неоднородности грунта на дебит.

## РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С НЕОДНОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Р.Ф. Марданов, И.З. Ибрагимов**

*Казанский Федеральный Университет, Казань*

ilmir.soap@gmail.com

В настоящей работе предложен метод расчета течения в пористой среде с неоднородной проницаемостью, основанный на методе граничных элементов с включением площадных элементов. Эффективность метода продемонстрирована на примере расчета обтекания пористого цилиндра, расположенного в пористой среде в случае их различных проницаемостей. Сравнение результатов расчета с известным аналитическим решением этой задачи показало хорошую точность полученных численных результатов.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 1.13556.2019/13.1.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ В МОДЕЛИ БРИНКМАНА

**Р.Ф. Марданов, В.Ф. Шарафутдинов, Ш.Х. Зарипов**

*Казанский федеральный университет, Казань*

Renat.Mardanov@kpfu.ru

Предложен метод определения параметров фильтрационной модели Бринкмана для задач о течениях несжимаемой жидкости в пористых средах, основанный на сравнении аналитического решения в рамках модели Бринкмана с численным решением задачи Стокса для течения в межпоровом пространстве. Получены зависимости проницаемости и эффективной вязкости от пористости. Проведена верификация найденных зависимостей. Выполнено сравнение моделей Дарси и Бринкмана и проанализирована их применимость.

Работа выполнена при поддержке программы повышения конкурентоспособности КФУ и за счет средств субсидии КФУ для выполнения государственного задания проект № 1.13556.2019/13.1.

## НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В СОВРЕМЕННОЙ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОМЕХАНИКЕ

**В.М. Максимов**

*Институт проблем нефти и газа РАН, Москва*

vmaks@ipng.ru

Представлен ряд новых результатов по определению материальных функций гидродинамических моделей (преимущественно, относительных фазовых проницаемостей). Рассмотрены поверхностное взаимодействие флюидов на межфазных границах, эффекты анизотропии и сжимаемости фаз, новый механизм макрозащемления флюидов в анизотропных средах.

Работа выполнена при поддержке программы № 47 Президиума РАН.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ СИСТЕМЫ «МЕТАН-ВОДА» С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

**Е.Ф. Моисеева[1], К.В. Моисеев[1,2], Ю.В. Калиновский[1]**

[1]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

[2]*Институт механики УФИЦ РАН, Уфа*

elena.f.moiseeva@gmail.com

При разработке газовых и газоконденсатных месторождений в пласте непрерывно происходят теплообменные процессы, которые оказывают влияние на фильтрацию газа. В работе проведено математическое моделированиепроцесса фильтрации метана в присутствии связанной воды. Получены распределения давления, температуры, насыщенности и мольных долей компонентов в радиальном пласте с учетом фазовых переходов и конвективного теплообмена между фазами.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТАХ С ИСКУССТВЕННОЙ ИЛИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТЬЮ

**П.Е. Морозов**

*Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

morozov@imm.knc.ru

В работе получены аналитические решения задач о распространении фильтрационных волн давления в пластахс искусственной или естественной трещиноватостью. Исследуется распространениефильтрационных волн давления в пласте с трещиной гидроразрыва конечной и бесконечной длины, а также в окрестности вертикальной скважины в трещиновато-пористом пласте с учетом нестационарного обмена жидкости между трещинами и пористыми блоками.

## УПРАВЛЕНИЕ ЗАВОДНЕНИЕМ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕФТЕНАСЫЩЕННЫХ МНОГОПЛАСТОВЫХ СИСТЕМ

**Э.Н. Мусакаев[1,2], С.П. Родионов[1,2,3], В.П. Косяков[1,2]**

[1]*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень*

[2]*ООО «Юни-КОНКОРД», Тюмень*

[3]*Тюменский государственный университет, Тюмень*

musakaev91@gmail.com

Рассматривается задача определения оптимальных значений продуктивностей добывающих и нагнетательных скважин, вскрывающих многопластовую нефтяную залежь. Решение задачи осуществляется с применением инструментов теории оптимального управления и гидродинамического моделирования. Применение разработанной методики управления заводнением многопластовых систем показано на примере задачи выравнивания профиля приемистости нагнетательной скважины.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00049.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СМЕНЫ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

**Н.Г. Мусакаев[1], М.К. Хасанов [2]**

[1]*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень*

[2]*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, г.Стерлитамак*

musakaev@ikz.ru

Представлены результаты исследования процесса закачки газа в пористыйпласт, поры которого в начальном состоянии насыщены метаном и водой, с учетом гидратообразования. В осесимметричном приближении выполнена математическая постановка данной задачи для случая ступенчатого распределения температуры в пласте. С использованием метода последовательных смен стационарных состояний построено приближенное решение со скачком температуры на фронте фазовых переходов в виде функции координаты этой границы от параметровпористойсредыи нагнетаемого в пласт газа. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-10023.

## К ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ТРЕЩИНЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ПОРИСТОЙ И ПРОНИЦАЕМОЙ СРЕДЕ

**З.М. Нагаева**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

Nagaeva_Zilya@mail.ru

На основе модели, описывающей фильтрационное течение в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте, рассматриваются задачи о распространении гармонических колебаний давления от скважины по трещине и задачи об отборе жидкости или газа из скважины в режиме постоянного перепада давления или постоянного расхода. Получены точные аналитические и приближенные решения, на основе которых можно проанализировать влияние коллекторских характеристик пласта и трещины, а также реологических свойств насыщающей жидкости или газа на эволюцию давления в трещине и дебит скважины.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ В ЭЛЕМЕНТЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**Ю.А. Питюк, А.А. Мусин, Л.А. Ковалева, Р.Р. Фахреева**

[1]*Башкирский государственный университет, Уфа*

PityukYulia@gmail.com

Работа посвящена исследованию водогазового воздействия на нефтяные залежи и разработке соответствующего программного модуля. Рассматривается трехфазная фильтрация воды спузырьками газа, нефти и свободного газа в пласте с учетом роста и укрупнения мелких пузырьков в порах, образования свободной газовой фазы, эффекта проскальзывания, сжимаемости сети трещин и неизотермичности процесса. Проведен анализ результатов численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20102.

## ГРАНИЧНЫЕ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ В АНИЗОТРОПНОМ НЕОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

**В.Ф. Пивень**

*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орёл*

pivenvf@gmail.com

Разрабатываетсятеория математических моделей трёхмерных и двумерных фильтрационных течений в анизотропном и неоднородном пласте грунта. Пласт характеризуется в общем несимметричным тензором проницаемости (проводимости), компоненты которого могут терпеть разрывы на произвольной гладкой поверхности (линии). Ставятся и исследуются стационарные первая и вторая краевые задачи, задача сопряжения и нестационарная задача эволюции границы раздела жидкостей различных физических свойств (вязкости, плотности). Исследованы конкретные граничные задачи о работе скважин в анизотропно-неоднородных пластах с учётом подвижной границы раздела жидкостей (водо-нефтяного контакта или загрязнений).

## ЗАМЕЩЕНИЕ МЕТАНА ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА В ГАЗОГИДРАТНОМ ПЛАСТЕ

**Г.Р. Рафикова**

*Институт механики им.Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

rafikova_guzal@mail.ru

Представлена математическая модель процесса вытеснения метана диоксидом углерода в пористом пласте, изначально насыщенном метаном и его гидратом. Предложена схема кинетики газозамещения, в которой интенсивность процесса лимитируется диффузией двуокиси углерода через гидратный слой, образовавшийся между потоком газовой смеси и гидратом метана. Проведен численный анализ влияния основных параметров на динамику процесса, на расход и массу добываемого метана и законсервированного углекислого газа. Определены характерные этапы процесса.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССО- И ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОБВОДНЕННОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ ПРИ ЕГО ИСКУССТВЕННОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ

**М.А. Семин, Л.Ю. Левин**

*Пермский федеральный исследовательский центрУральского отделенияРоссийской академии наук, Пермь*

seminma@outlook.com

В статье сформулирована двумерная двухфазная задачи Дарси-Стефана применительно к проблеме искусственного замораживания обводненного породного массива при проходке шахтных стволов. Численное решение поставленной задачи получено с использованием метода конечныхразностей на регулярной неоднородной сетке. Исследована зависимость времени образования замкнутого ледопородного ограждения вокруг строящейся горной выработки от фильтрационных характеристик породного массива и параметров фазового перехода содержащейся в нем воды для условий строящихся шахтных стволов рудника Петриковского Горно-обогатительного комбината.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01204.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

**Е.И. Скрылева**[1,2]

[1]*Научно-исследовательский институтсистемных исследований Российской академии наук, Москва*

[2]*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,Москва*

jennyne@yandex.ru

Исследуется капиллярное просачивание жидкостей в пористых средах в условиях микрогравитации. Представлены эксперименты по течению жидкости в неоднородной искусственной пористой среде. Экспериментальные данные сравниваются с результатами трехмерного численного моделирования, основанного на нестационарной математической модели течения многофазной жидкости в образце пористой средыс учётом инерционных эффектов. Исследовано поведение фронта просачивания при прохождении через границу сред с различной проницаемостью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-15080.

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ КЕРНА

**Л.И. Стамов**[1,2]

[1]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва*

[2]*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, г. Москва*

lyubenstamov@mail.ru

В работе проведено выделение структуры скелета образца керна на основании данных его рентгеновской томографии. Проведена оценка пористости и проницаемости выделенной структуры с помощью вычислительного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости в данной системе каналов и пор. Проведена оценка зависимости проницаемости от размера вырезаемого образца и от размера вычислительной сетки. Представлена зависимость проницаемости от установленного порогового значения коэффициента поглощения рентгеновского излучения для выбранного участка керна. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-15080.

## РАЗРАБОТКА НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПЛАСТОВ СИСТЕМОЙ ПАРНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН, ПОДВЕРЖЕННЫХ ГРП

**Ю.А. Тазетдинова**

*Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск*

ym_julia@mail.ru

Построена математическая модель процесса фильтрации жидкости между двумя гидроразрывными трещинами, в одну из которых поступает вода из имеющейся горизонтальной скважины, а в другую, называемую добывающей, поступает вытесненная из пласта нефть. Проанализированы расходы закачанной в пласт и вытесненной из пласта жидкости.

## КОНВЕКТИВНЫЕ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ У ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТИ И ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**И.В. Тюлькина, К.Б. Циберкин**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

kbtsiberkin@psu.ru

Теория пограничного слоя применена для изучения структуры неизотермического течения вблизи границы раздела однородной жидкости и пористой среды. Рассмотрены две конфигурации: пограничный слой у границы, которая поддерживается при постоянной температуре, и конвективный факел над точечным источником тепла, расположенным на границе раздела. Получены зависимости ширины пограничного слоя от параметров систем. Выполнен сравнительный анализ структуры пограничных слоёв.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-00057.

## МЕХАНИКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЕГАЗОВЫЕ СИСТЕМЫ

**М.А. Фатыхов [1], Р.И. Саитов [1], Р.Г. Абдеев[2], Л.М. Фатыхов [1]**

[1] *Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа*

[2] *Башкирский государственный университет, Уфа*

fatykhovma@mail.ru

Исследовано отражение электромагнитных волн от нагрузки и коаксиальной линии. Установлена зависимость коэффициента стоячей волны от коэффициентов затухания ее в линии и отражения от нагрузки. Полученная формула позволяет оценить мощность энергии, вводимой в нефтяной пласт через скважину.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-24178.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ В АНИЗОТРОПНОМ СЛОЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**Ю.С. Федяев**

*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орёл*

fedyaevys@gmail.com

Ставится двумерная задача эволюции границы раздела различных жидкостей в однородном анизотропном слое пористой среды. Жидкости различаются вязкостью и плотностью.Область фильтрации может ограничивать контур питания или непроницаемая граница. С помощьютеории потенциала задача сведена к решению системы из интегрального и дифференциального уравнений с заданным начальным условием. Предложен численный алгоритм решения полученных уравнений на основе метода дискретных особенностей. Исследованы конкретные задачи эволюции границы раздела жидкостей к скважине.

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ЧЕРЕЗ ГРАНУЛИРОВАННЫЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

**С.С. Фецов[1,2], Н.А. Луценко[1,2]**

[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

[2]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

fetc95@mail.ru

Для исследования нестационарных течений газа через слой гранулированного материала с фазовым переходом предложены математическая модель и конечно-разностный метод. Сравнение результатов расчетов с данными экспериментов показало их хорошее совпадение. Численно исследовано влияние сжимаемости газа и показано, что пренебрежение сжимаемостью газа при моделировании таких процессов может приводить к значительным погрешностям, а также не может гарантировать оценку сверху или снизу для реального времени процесса. Изучено влияние боковых теплопотерь в исследуемом слое гранулированного материала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы «Дальний Восток» 2018–2020 (проект 18-5-064).

## ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА ЧЕРЕЗ ЗАРЯЖЕННЫЙ ПОРИСТЫЙ СЛОЙ

**А.Н. Филиппов**

*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва*

filippov.a@gubkin.ru

В рамках термодинамики неравновесных процессов предложена ячеечная модель пористого слоя (ионообменной мембраны). Предполагается, что мембрана состоит из упорядоченной совокупности пористых заряженных частиц сферической формы, помещенных в сферические оболочки, заполненные раствором бинарного электролита. Поставлена задача определения всех кинетических коэффициентов матрицы Онзагера и получено общее решение краевой задачи на ячейке.Аналитически решена краевая задача для определения гидродинамической проницаемости такой мембраны в случае граничного условия Кувабары на поверхности ячейки. Работа выполнена при поддержке РФФИ(грант № 17-08-01287) иМинобрнауки (грант № 14.Z50.31.0035).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ В ПЛАСТАХ С ТРЕЩИНОЙ ГРП

**И.Л. Хабибуллин, А.А. Хисамов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

habibi.bsu@mail.ru

В работе представлены новые аналитические решения задачи о нестационарном распределении давления вокруг скважины, пересеченной вертикальной трещиной при краевых условиях первого, второго и третьего родана забое скважины.Используя метод преобразования Лапласа, получены выражения для распределения давления в трещине и в пласте.Полученные решения позволяют количественно оценить влияние коллекторских параметров пласта и трещины на распределение давления и дебит скважины. Эти решения также представляют интерес для теоретического обоснования методов гидродинамических исследований пластов.

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ, СНЯТЫХ ОДНОВРЕМЕННО НА РАЗНЫХ УЧАСТКАХ СТВОЛА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

**М.Х. Хайруллин[1], Е.Р. Бадертдинова[2], Р.М. Хайруллин [2]**

[1]*Институт механики и машиностроения - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

[2]*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань*

khairullin@imm.knc.ru

Отличительной чертой обратных задач нефтегазовой гидромеханики, связанных с исследованием математических моделей реальных процессов фильтрации в нефтяных пластах, является то, что характер дополнительной информации определяется возможностями промыслового эксперимента. Предлагается метод интерпретации кривых изменения температуры и давления, снятых одновременно несколькими глубинными измерительными автономными приборами, установленными в различных участках ствола горизонтальной скважины с учетом коэффициента влияния ствола скважины.

## УПРУГИЙ РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИИ К ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ ИЗ ПЛАСТА, ПОДВЕРЖЕННОГО ГРП, КОГДА ПРОТЯЖЕННОСТЬ ТРЕЩИНЫ МЕНЬШЕ РАДИУСА КОНТУРА ПИТАНИЯ

**И.Р. Хамидуллин**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

ildarkhamidullin@gmail.com

Для фильтрации флюидов в системе «скважина – трещина – пласт» получено одно интегро-дифференциальное уравнение, описывающее фильтрационные волны давления в трещинах и для этого уравнения построены точные, а также приближенно аналитические решения, описывающие динамику распространения давления в трещинах при гармонических режимах изменения давления в

скважине, а также для ситуаций, когда в скважине происходит внезапное изменение давления или скважина начинает функционировать в режиме постоянного дебита.

## СТРУКТУРА И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТИ И ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**К.Б. Циберкин**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

kbtsiberkin@psu.ru

Представлено исследование структуры профилей скорости двумерных (не плоскопараллельных) течений, реализующихся в двухслойной системе «жидкость–пористая среда», а также результаты изучения линейной задачи устойчивости таких течений. Продемонстрирована возможность реализации двумерного течения в широком диапазоне параметров. Данное течение преимущественно более устойчиво, чем плоскопараллельное. При большой относительной толщине пористой среды реализуется новый длинноволновый механизм неустойчивости, критическое число Рейнольдса для которого оказывается ниже, чем для плоскопараллельного течения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-00057.

## РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНАЯ ПОРИСТАЯ ЧАСТИЦА В ЛИНЕЙНОМ СДВИГОВО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ПОТОКЕ

**И.В. Чернышев**

*Волгоградский государственный университет, Волгоград*

chernyshev_iv@volsu.ru

Решена задача стационарного обтекания неоднородной пористой сферической частицы поступательным и сдвиговым потоками вязкой жидкости в приближении Стокса-Дарси с условиями скольжения на границе. Суперпозиция этих задач дает общее решение для неоднородной сферической частицы в произвольном линейном сдвигово-поступательном потоке. Для пористой частицы с коэффициентом проницаемости, меняющимся по степенному закону в зависимости от радиуса, получено аналитическое решение, определяющее поля скорости и давления жидкости снаружи и внутри частицы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-340015.

## ДВУХФАЗНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТИ В СИСТЕМЕ «НЕФТЬ – ВОДНЫЙ РАСТВОР ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ»

**А.Б. Шабаров, О.А. Кузина**

*Тюменский государственный университет, Тюмень*

o.a.kuzina@utmn.ru

В докладеизложены физические основы процессов вытеснения и основные параметры, характеризующие физико-химические свойства поверхностей раздела фаз и закономерности их взаимодействия, такие как работа адгезии, смачивание, межфазное натяжение. Экспериментально установлено, что параметром, существенно влияющим на вытеснение нефти с применением поверхностно-активных веществ, является работа адгезии нефти. На примере образца керна (песчаник) при температуре 40 °С и давлении 25 МПа получено критериальное уравнение, позволяющее рассчитывать коэффициент вытеснения в зависимости от двух безразмерных параметров: капиллярного числа и относительной работы адгезии нефти.

## МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

**Е.Л. Шараборин, А.Р. Касимов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов,*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

Evgenii.Sharaborin@skoltech.ru

Пористость в композитных материалах приводит к ухудшению их физико-механическимсвойств. Для исследования механизмов образования пористостиразработана вычислительная программа для моделирования течения смолы через армирующую матрицу. Сформулирована модель несжимаемого, многофазного течения в пористой среде с учетом эффектов поверхностного натяжения. Модельреализована на параллельном программном обеспечении BASILISK с адаптивной генерацией сетки. Получены численные результаты для насыщенного и ненасыщенного потока жидкости с пузырьками через пористую среду.

## Подсекция III-1. ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И ВЯЗКОУПРУГОСТИ

### АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ МАССЫ ПЛАСТИНЫ ОТ ФОРМЫ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ

**Л.А. Адегова[1, 2], С.А. Гаращук[2], С.Ф. Лосев[2]**

[1]*Сибирский государственный университет путей сообщений, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск*

adegova@mail.ru

При проведении исследования зависимости массы конструктивного элемента от формы концентратора напряжений созданы конечно-элементные модели (КЭМ) пластин без выреза и с вырезами разной конфигурации. С использованием пакета конечно-элементного анализа получены результаты напряжённо-деформированного состояния (НДС) и проведена оценка увеличения эквивалентных напряжений по кромкам вырезов. Для усиления конструктивных элементов с вырезами были рассмотрены модели пластин с окантовкой. С использованием конечно-элементного анализа проведён расчёт оптимизации панелей и созданы конструктивные элементы с вырезами минимальной массы, удовлетворяющие условию прочности.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МЕХАНИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПОТЕНЦИАЛАМИ МУНИ-РИВЛИНА И ЙЕО

**Д.А. Азаров [1],А.Д.Азаров [2]**

[1]*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

danila_az@mail.ru

[2]*ООО "Тензор-Транс", Ростов-на-Дону*

polyani49@mail.ru

Разнообразие высокоэластичных материалов и их свойств приводит к необходимости создания разных моделей для их описания в рамках нелинейной теории упругости. Авторами предложен новый подход к построению упругого потенциала нелинейной среды - метод механико-геометрического моделирования. В данной работе проведеносравнение полученных этим методом новых форм удельной потенциальной энергии деформации с часто используемыми моделями полиномиального типа -Муни-Ривлина и Йео, при разных напряженно-деформированных состояниях.

### ВЯЗКОУПРУГАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ БЛОЧНОЙ СРЕДЫ

**Н.И.Александрова**

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск*

nialex@misd.ru

Численно исследуется распространение сейсмических волн в блочной среде. Среда моделируется пространственной решеткой масс, соединенных вязкоупругими пружинами. Для прослоек используется реологическая модель с двумя элементами Максвелла и одним элементом Фойгта. В рамках этой модели изучается воздействие вертикальной точечной нагрузки на поверхность полупространства и на поверхность слоя, лежащего на полупространстве. Рассчитаны скорости перемещений поверхностных блоков. Исследовано влияние коэффициента качества материала на затухание их амплитуд.

Работа выполненав рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090002-5

### НЕОДНОЗНАЧНОЕ ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛИМЕРА НА ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНОГО КОМПЛЕКСА

**А.Т. Ахметов [1,2], Д.А. Илаш [2,3], А.А. Валиев[1], А.Г. Телин[3]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

[3]*ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа*

raideril@yandex.ru

Одним из наиболее эффективных и широко используемых методов увеличения нефтеотдачи для изоляции водонасыщенных высокопроницаемых коллекторов, макро- и микротрещин,является применение сшитых полимерных систем. По трем ключевым параметрам была разработанатрехкомпонентная сшитая система на основе силиката натрия, ацетата хрома и полиакриламида с оптимальными свойствами: 1)время потери текучести (~6часов); 2)предельное напряжение сдвига; 3)отношение упругой составляющей при нагрузке и разгрузке.Осцилляционные испытания использовались для определения предельного напряжения сдвига, а испытания на «ползучесть и восстановление» позволилиопределить вязкую и упругуюреакцию материалов.

## КОЭФФИЦИЕНТЫ АНИЗОТРОПНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ГРУНТОВ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ КОК ТОБЕБаймахан, А.А. Сейнасинова[2], Р.Б. Баймахан[3], Г.М. Баймаханова[4], Б.Б. Оразхан[5]

[1]*Атырауский государственный университет, Казахстан, Атырау*
[2]*Академия пограничной службы национальной безопасности, Казахстан, Алматы*
[3]*Институт механики и машиноведения им. Академика У.А. Джолдасбекова Казахстан, Алматы*
[4]Южно –*Казахстанский государственный педагогический университет, Шымкент*
[5]*Институт механики и машиноведения им. Академика У.А. Джолдасбекова Казахстан, Алматы*
*brysbekbai@gmail.com*

Работа посвящена уточнению методики вычисления коэффициента фильтрации (КФ) применительно к покровным грунтам оползневых склонов слоистого строения. Описываются проблемные вопросы, связанные с продолжающимися оползневыми процессами происходящими на склонах горы и обращается внимание на не изученность вопроса фильтрации и инфильтрации. Излагается систематизированный алгоритм вычисления КФ для грунтов слоисто –анизотропного строения. Приводятся результаты вычисления значений коэффициентов фильтрации для некоторых типов склоновых покровных грунтов слоистого строения характерных оползне опасной горы Кок Тобе, которая является высочайшей точкой города Алматы.
Работа выполнена при поддержке гранта КНФ № AP05136194

## МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТЯХ С МНОГОГРАННЫМИ УГЛАМИ

**С.И. Безродных[1,2], В.И. Власов[1], С.Л. Скороходов[1]**
[1]*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва*
[2]*Государственный астрономический институт МГУ им. М.В.Ломоносова,Москва*
sbezrodnykh@mail.ru

Представлен аналитико-численный метод решения некоторых эллиптических уравнений с разрывными коэффициентами в областях с конусами произвольного сечения, в том числе с многогранными углами, и смешанными граничными условиями типа Дирихле–Неймана. Метод обеспечивает высокоточное нахождение показателей сингулярностей и коэффициентов интенсивности в вершине многогранного угла, а также решения задачи и его градиента во всей области вплоть до граней угла. Представлен ряд численных результатов, иллюстрирующих эффективность метода для реальных задач.

## О ВАРИАЦИОННОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЖЕСТКОГО ШТАМПА И УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ С ТРЕЩИНАМИ

**А.А. Бобылев**
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва*
abobylov@gmail.com

Рассмотрена задача о вдавливании жесткого гладкого выпуклого штампа в упругую полуплоскость, содержащую трещины. Контактное взаимодействие штампа с полуплоскостью и берегов трещин описывалось условиями одностороннего контакта. Получены формулировки задачи в виде граничного вариационного неравенства и эквивалентной ему задачи минимизации функционала на множестве статически допустимых напряжений, удовлетворяющих условиям совместности. Для дискретизации задачи использовались конечномерные пространства интегрированных фундаментальных решений. Получены численные результаты для полуплоскости с поверхностнымии внутренними трещинами, включая трещины с частично и полностью сомкнутыми берегами.

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЛ С ОТСЛАИВАЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ЯВНОМ УЧЕТЕ ПОЛЕЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

**И.В. Богачев, Р.Д. Недин**
*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*
bogachev89@yandex.ru, rdn90@bk.ru

В настоящей работе предложена модель установившихся колебаний предварительно напряженного тела с отслаивающимся покрытием на основе линеаризованной постановки задачи для упругого неоднородного преднапряженного тела. Задача для прямоугольной области с преднапряженным слоем-покрытием при наличии зоны отслоения исследована численно с помощью метода конечных элементов. Рассмотрена задача об идентификации уровня однородного предварительного напряженного состояния отслаивающегося покрытия поданным акустического зондирования поверхности объекта.
Работа выполнена при поддержке РНФ (код проекта 18-11-00069).

## СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ

**С.А. Бочкарёв, С.В. Лекомцев, В.П. Матвеенко, А.Н. Сенин**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
lekomtsev@icmm.ru

Работа посвящена численному исследованию динамического поведения упругих коаксиальных оболочек, в том числе выполненных из пьезоэлектрического материала, кольцевой зазор между которыми частично заполнен неподвижной или текущей вязкой сжима-

емой жидкостью. Решение задачи осуществляется в трёхмерной постановке с использованием метода конечных элементов. Оценка устойчивости базируется на вычислении и анализе комплексных собственных значений связанной системы уравнений. Исследовано влияние уровня заполнения жидкостью, величины кольцевого зазора и несоосности оболочек на собственные частоты, формы колебаний и гидроупругую устойчивость.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10054.

## К ДИАГНОСТИКЕ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

**А.О. Ватульян**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

vatulyan@math.rsu.ru

Рассмотрены различные типы коэффициентных обратных задач по реконструкции переменных модулей упругости, плотности, предварительных напряжений для моделей функционально-градиентных упругих тел с покрытиями. Представлены различные формулировки обратных задач на основе индентирования, теплового и акустического зондирования. Даны слабые и вариационные постановки, предложены способы получения операторных уравнений с компактными операторами. Разработаны методы диагностики покрытий на основе сочетания итерационных процедур и методов регуляризации, представлены конкретные примеры для полосы, цилиндра, волновода.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00069.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ПУЛТРУЗИОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОСЛЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

**А.Н. Ведерников, А. А. Сафонов, С.А. Гусев, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов,*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

aleksandr.vedernikov@skoltech.ru

В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований процесса короблениякомпозитных угловых профилей, изготовленных методом пултрузии на основе термореактивного связующего. Экспериментальные результаты показали, что детали подвержены явлению ползучести, тем самым увеличивая общее геометрическое искажение. Математическая модель, реализованная с помощью ПП ABAQUS, прогнозирует геометрические искажения, возникающие как непосредственно в процессе производства, так и в течениепоследующего хранения профилей. Разработанная конечно-элементная модель позволяет оценить влияние характеристик пултрузионного процесса и упругих/вязкоупругих свойств на величину коробление профиля.

## ОСОБЕННОСТИ КРАЕВЫХ ВОЛН В ПЛАСТИНАХ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ КРАЕВОГО ПРОФИЛЯ

**М.В. Вильде**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

mv_wilde@mail.ru

Изучается влияние формы краевого профиля на дисперсионные свойства краевых волн в пластинах. Для описания колебаний пластины применяется трехмерная теория упругости. Рассматривается полубесконечная пластина с трапециевидной формой поперечного сечения в окрестности торца (скошенные углы). Для решения задачи применяется метод разложения по модам. Показано, что наличие скосов оказывает значительное влияние на поведение фундаментальных краевых волн при стремлении частоты к бесконечности. Другой интересной особенностью краевых волн в пластинах со скошенными углами является существенное уменьшение затухания волн высшего порядка в определенном интервале частот.

## АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ О КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

**В.И. Власов**[1]

[1]*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва*

vlasov@ccas.ru

Представлено приложение к некоторым задачам теории упругости аналитико-численного метода решения задачи Дирихле для уравнения Пуассона в областях сложной формы, содержащих скругленные входящие углы или узкие щели. Вблизи таких участков границы, как известно, возникает концентрация напряжений. Метод основан на построении в явном аналитическом виде аппроксимативных систем функций, которые адекватно отражают структуру решения задачи вблизи контура скругленного угла или узкой щели, соответствуют оператору этой задачи и обладают хорошими аппроксимативными свойствами. Метод имеет экспоненциальную скорость сходимости, высокую эффективность и позволяет вычислять не только само решение, но и его производные вплоть до контура угла или щели, а также находить коэффициенты интенсивности в особенностях решения. Кроме того, метод дает возможность проводить качественные исследования, в том числе получать асимптотики решения и его производных при сингулярном деформировании области, например, при стремлении к нулю ширины щели или радиуса закругления угла. Представлены результаты численной реализации метода и вид ряда асимптотик с явно выписанными коэффициентами.

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА НЕОСЕСИММЕТРИЧНУЮ ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ КРУГЛЫХ ПЛАСТИН И ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК

**Е.Б. Воронкова, С.М. Бауэр**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

e.voronkova@spbu.ru

В работе численным методом исследована потеря устойчивости осесимметричных форм равновесия неоднородных круглых пластин и пологих сферических оболочек, закруженных нормальным давлением. Найдено критическое давление, при котором возможна бифуркация панели/пластины в неосесимметричное состояние. Показано, что при уменьшении жесткости оболочки к краю переход в неосесимметричное состояние происходит при существенно меньшей нагрузке, чем для оболочки постоянной жесткости, но с образованием большего числа волн.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00832.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ГТД НА ЗАРОЖДЕНИЕ ПОР ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**А.В. Галактионова, А.К. Емалетдинов**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа*

emaletd@mail.ru

Исследован процесс зарождения поры критического размера системой избыточных вакансий при действии нестационарной термомеханической нагрузки. На основании термодинамических условий получены уравнения для критического размера зарождения поры с учетом влияния энергии границ зерен, дислокаций и несоответствия решеток. Проведено численное решение системы уравнений и сравнение с экспериментальными данными.

## ПРОБЛЕМА СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**В.Р. Ганиева[1],О.П. Тулупова[1], А.А. Круглов[2], Р.Я. Лутфуллин[2], О.А. Руденко[2], Ф.У. Еникеев[1]**

*[1]Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

*[2]Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

alexform1960@mail.ru

Рассмотрен процесс сверхпластической формовки трехслойных конструкций с гофрированным наполнителем. Основное внимание уделено решению проблемы образования складок на наружной поверхности конструкции. Рассматриваются различные комбинации ультрамелкозернистых и микрокристаллических листов в качестве обшивки и наполнителя с помощью конечно-элементного моделирования. Для анализа применяется стандартный степенной закон сверхпластичности, а для определения значений материальных постоянных используются технологические эксперименты. Показано, что эффективным способом устранения складок является использование листа наполнителя с ультрамелкозернистой структурой.

## ОБОБЩЁННЫЕ ДЕФОРМАТОРЫ И УРАВНЕНИЯ СОВМЕСТНОСТИ ИХ КОМПОНЕНТ

**Д.В. Георгиевский[1,2]**

[1]*Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

georgiev@mech.math.msu.su

Для компонент обобщённых деформаций ранга $m$, связанных с обобщёнными перемещениями ранга $m-1$аналогами кинематических соотношений Коши в $n$-мерном пространстве (многомерной сплошной среде) ($m> 1, n> 2$) выводятся уравнения совместности. Они могут быть записаны в виде равенства нулю всех компонент тензора несовместности ранга $m(n-2)$либо дуального к нему обобщённого тензора Римана – Кристоффеля ранга $2m$. Находится число независимых компонент этих тензоров, совпадающее с числом уравнений совместности в терминах обобщённых деформаций или напряжений. Обсуждаются неэквивалентность полной системы уравнений совместности и любой её ослабленной подсистемы, а также различные постановки краевых задач в обобщённых напряжениях, в которые число уравнений совместности может превышать число неизвестных.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 18-29-10085мк, 19-01-00016а.

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДОК ФУНДАМЕНТА НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПО ДАННЫМ ДЕФОРМАЦИОННОГОМОНИТОРИНГА

**И.О.Глот [1], М.Л.Бартоломей [2], Р.В. Цветков [1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный политехнический университет, Пермь*[2]

glot@icmm.ru

Представленырезультаты математической обработки экспериментальных данных осадок фундаментов строительной конструкции торгово-развлекательного центра. Экспериментальные данные получены с использованием разработанной автоматизированной

системы деформационного мониторинга. Их использование в качестве граничных условий при моделировании напряженно-деформированного состояния конструкции позволило проследить эволюцию состояния элементов конструкции в течение 9-летнего периода наблюдения. Высокая частотность измерений позволила установить временные зависимости скоростей изменений деформационных параметров, которые явились основой для оценки времени безопасной эксплуатации конструкции.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ ВОЛОКОННО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОВЕРХНОСТНЫХ БЕГУЩИХ ВОЛН

**Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, А.А. Еремин**

*Институт математики, механики и информатики КубГУ, Краснодар*

evg@math.kubsu.ru

Волновые процессы в волоконно-армированных композитах моделируются в рамках динамической теории упругости для многослойных произвольно-анизотропных сред. Эффективные параметры модели определяются путем минимизации невязки между измеренными и расчетными характеристиками ультразвуковых поверхностных волн, возбуждаемых и регистрируемых активными пьезосенсорами или средствами лазерной виброметрии. Для обнаружения и оценки вида и размера дефектов (трещины, расслоения) реализован метод обращения времени, фокусирующий обращенное волновое поле на рассеивающем дефекте. Приводятся результаты экспериментальной верификации.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России № 9.1022.2017/4.6.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Г.Л. Горынин**

*Сургутский государственный университет, Сургут*

ggorynin@list.ru

Рассмотрена модель локально упругого тела применительно к нелинейному поведению бетонов, фибробетонов и грунтов. Установлена зависимость экспериментальных деформационных кривых с деформационными функциями локально упругого тела. Получены аналитические решения расчета трубобетонных конструкций под действием центральной сжимающей нагрузки. Получено аналитическое решение задачи о равномерном сжатии грунта в жестой обойме, найдены аналитические формулы для перемещения грунта в продольном направлении и обжатия грунта в поперечном направлении. Рассмотрены основы применения численных методов расчета сложных конструкций при использовании модели локального упругого тела и сделаны выводы о перспективности такого использования в численных расчетах.

## АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

**Д.О. Демин [1]**

*[1]МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва*

ddemin@hse.ru

Остаточные напряжения, возникающие в процессе волочения, оказывают существенное влияние на качество получаемых проволок. Работа посвящена исследованию остаточных напряжений, возникающих в ходе процесса волочения в зависимости от степени обжатия. Проведено имитационное моделирование процесса волочения методом конечных элементов. Для различных степеней обжатия построены распределения компонент тензора остаточных напряжений по радиусу проволоки.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ

**Н.А. Докукова[1], П.Н. Конон[2]**

*Белорусский государственный университет, Минск*

dokukova@mail.ru

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние витой цилиндрической пружины, использующейся во многих технических устройствах. Для описания динамической задачи теории упругости были приняты гипотезы плоского сечения при кручении и изгибеи ненадавливания слоев. Получена математическая модель перемещений и поворотов изгибающегося в соприкасающейся плоскости к виткам и закручивающегося в поперечных сечениях элемента пружины. Представлены аналитические решения и графические зависимости.

Работа выполнена при поддержке гранта ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», задание «Механика – 1.36» Республики Беларусь.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОСКОСТИ С МЕЖФАЗНОЙ ТРЕЩИНОЙ ДЛЯ ПОЛУЛИНЕЙНОГО МАТЕРИАЛА

**Т.О. Доманская[1], В.М. Мальков[2], Ю.В. Малькова [3]**

[1, 2, 3] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

tanyath57@gmail.com

Получено аналитическое решение нелинейной задачи для композитной плоскости с межфазной трещиной для полулинейного материала. Предполагается, что трещина свободна, на бесконечности заданы постоянные номинальные напряжения. Из общего решения задачи построены асимптотические разложения номинальных напряжений и напряжений Коши в окрестностях вершин трещи-

ны. Получены формулы, описывающие раскрытие берегов трещины для разных видов нагрузки. Выполнены численные расчеты напряжений для трещины в однородной плоскости в пакете FreeFem++ и результаты сопоставлены с аналитическим решением.

## РЕГУЛЯРИЗОВАННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ НЕКОРРЕКТНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

**Р.Г. Дьяконов, Ю.М. Григорьев**

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск*

diacon.radik2013@mail.ru

В работе получено аналитическое регуляризованное решение задача Коши для уравнения Ламе в прямоугольной области, когда на одной стороне заданы значения перемещений и напряжений, на боковых сторонах смешанные краевые условия, на оставшейся стороне нет краевых условий. Используется метод метод Лиу аналитического решения задачи Коши для уравнения Лапласа в прямоугольнике. Получена оценка сходимости регуляризованного решения к точному. Показано, что если решение исходной задачи существует, то разность между разложениями решений исходного и регуляризованного уравнений стремится к нулю при стремлении параметра регуляризации к нулю. Приведен пример численной реализации метода.

## ПРИМЕСЬ, КАК ГЕНЕРАТОР НОВЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ СИНУС-ГОРДОНА

**Е.Г. Екомасов[1], А.М.Гумеров[1], Р.В.Кудрявцев [2]**

[1]Башкирский государственный университет, Уфа,

[2] Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, Уфа,

ekomasoveg@gmail.com

Исследова нанелинейная динамика солитонных решениймодифицированных уравнений синус-Гордона, двойного синус-Гордонав модели с примесями. Примеси рассматривались как генераторыновых мультисолитонных решений. С помощью метода коллективныхпеременных построена теория одномерной динамики рассеяниякинков уравнения синус-Гордона на произвольном числепритягивающих примесей, с учётом возбуждения примесных мод, вприсутствии внешней силы и неоднородной диссипации.Спомощьюполученных интегро-дифференциальных динамических уравненийисследованы некоторые частные случаи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00122.

## ДИСЛОКАЦИИ СОМИЛИАНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧНОСТИ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**А.К. Емалетдинов**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа*

emaletd@mail.ru

Предложена модель, описывающая дефекты в структуре аморфных материалов и гра-ниц зерен. Показано, что в таких материалах возможны движущиеся дефекты (квазидислокации), вектор Бюргерса которых осциллирует, т.е. дислокации Сомилианы. Впервые вычислены напряжения и энергия дислокаций Сомилианы, которые принципиально отличаются от решеточных дислокаций. Кинетика квазидислокаций позволила объяснить структурные данные пластичности аморфных и наноструктурных материалов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФЕНОВЫХ НАНОПУЗЫРЬКОВ

**П.А. Жиляев[1], Е.С. Яковлев[1], И.Ш. Ахатов[1]**

[1]*Центр проектирования, производственных технологий и материалов, Сколковский институт науки и технологий, Москва*

p.zhilyaev@skoltech.ru

Графен и другие двумерные кристаллы (BN, MoS2 и др.) могут быть использованы для конструирования слоистых Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур. Во время технологического процесса сторонние атомы или молекулы могут попасть в пространство между слоями, образуя пузырьки и блистеры нанометрового размера. В дальнейшем систему, состоящую из подложки, внешнего двумерного кристалла и вещества, находящегося между ними, мы будем называть Ван-дер-Ваальсовыми нанопузырьком. Частным случаем Ван-дер-Ваальсова нанопузырька является графеновый нанопузырёк, когда двумерным кристаллом является графен. В данной работе проведено теоретическое исследование фазовых переходов аргона в графеновых нанопузырьках.

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВА С ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ТРЕЩИНОЙ

**А.И. Жорник[1], В.А. Киричек [2]**

[1,2]*Таганрогский институт имение А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Таганрог*

Zhornik_Victoria@mail.ru

Рассматривается динамическая задача термоупругости для пространства с плоской полубесконечной трещиной, к берегам которой прикладывается симметричная относительно трещины нормальная импульсная растягивающая нагрузка. Причем нагрузка распределена таким образом, что она равна нулю у вершины трещины на некотором участке вдоль берегов трещины, что встречается довольно часто в практике экспериментального исследования. Проводится оценка изменения величины коэффициента интенсивности напряжений (КИН) за счет недогрузки берегов трещины на некотором участке около её вершины.

## АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЗАДАЧЕ ОБ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРА ИЗ СЖИМАЕМОГО УПРУГОГО МАТЕРИАЛА ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

**К.М. Зингерман [1,2]**

[1]*Тверской государственный университет, Тверь*

[2]*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула*

zingerman@rambler.ru

Исследуется для случая больших деформаций решение статической задачи об осесимметричной плоской деформации полого цилиндра из нелинейно-упругого сжимаемого изотропного материала под действием внутреннего давления. С учетом осевой симметрии задача сводится к задаче Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, которая решается численно. Анализируется зависимость радиальных перемещений и окружного напряжения от приложенного давления. Выявлено существование предельного давления, при превышении которого решение не существует.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме: «Разработка прототипа инженерного программного обеспечения на основе высокопроизводительных вычислений для оценки механических характеристик изделия, изготовленного с использованием аддитивных технологий (методом селективного лазерного спекания) с учетом стратегии изготовления изделия» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0271.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЛ

**Л.А. Игумнов[1], С.Ю. Литвинчук [1], И.А. Волков [1], Ф. Делль Изола [1]**

[1]*Научно-исследовательский институт механикиНижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород*

igumnov@mech.unn.ru

Изучается упругопластическое и вязкоупругое деформирование трехмерных тел на фоне действия полей немеханической природы. В качестве универсального численно-аналитического метода моделирования развивается метод граничных интегральных уравнений с гранично-элементной технологией поиска решения. Коллокационные приближения используют матрицы Сомильяны и формулы Грина-Бетти. Рассматриваются решения задач упругопластического, электро- и поро-вязкоупругого деформирования трехмерных тел сложной формы. Представлены результаты гранично-элементных решений. Работа выполнена при поддержке ФЦП № 14.578.21.0246, грантов РФФИ №18-08-00895, 18-08-00881, гранта Правительства РФ № 14.Y26.31.0031.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ НИТЕЙ

**С.И. Исмоилова[1], Ш.Э. Туланов [2]**

[1]*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, Узбекистан, Ташкент*

[2]*Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности*

ismailova.sabida@mail.ru

На основе физически нелинейной упруго-вязкопластической модели деформирования композитных нитей, расчетным путем определено влияние скорости деформирования на значение прочности хлопковых пряж при растяжении. Хлопковая пряжа, как композитная нить, состоит из скрученных хлопковых волокон длиной 0.03 – 0.05 м. При растяжении до обрыва, деформация разрыва нити считается постоянной и не зависящей от скорости нагружения. Результаты расчетов показывают, что с увеличением скорости деформирования, сопротивление хлопковой пряжи к разрыву увеличивается 1.5 – 2 раза. Следовательно, растет прочность волокнистого композитного материала с ростом скорости деформирования при растяжении.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОР НЕФТЯНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗОК

**Е.А.Кисляков, А.А. Матросов**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

amatrosov@donstu.ru

Рассмотрена задача расчета напряженно-деформированного состояния опор нефтяных сооружений морского базирования. Рассмотрен случай сложного нагружения опоры случайными внешними воздействиями. Проводится анализ уравнений движения механической системы под действием нескольких разнородных возбуждающих сил стохастической природы (сейсмическая активность основания, воздействие волн, воздействие ветра). С помощью комплекса конечно-элементного анализа ANSYS определенно напряженно-деформированное состояние опор.

## УЧЕТ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ АНАЛИЗЕ ТОНКОЙ ОБОЛОЧКИ С ИНТЕРПОЛЯЦИЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КАК СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ

**Ю.В. Клочков [1], Т.Р. Ищанов [1], М.Ю. Клочков [2], А.С. Андреев [1],**
[1]*Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*
ishchanov.volgau@ya.ru

Изложен алгоритм расчета тонких оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига. Отсчет угла наклона нормали выполнен от ее исходного состояния. Конечным элементом был выбран четырехугольный фрагмент срединной поверхности. Столбец узловых неизвестных содержит компоненты векторов перемещений и их первые производные по криволинейным координатам, а также компоненты вектора углов поворота нормали. При выводе матрицы жесткости конечного элемента размерностью 44x44 и столбца узловых усилий была реализована векторная форма интерполяционной процедуры, как наиболее эффективная при использовании криволинейных систем координат. На примере расчета цилиндрической оболочки доказана корректность разработанного алгоритма.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Администрации Волгоградской области № 19-41-343003 р_мол_а.

## ДВУМЕРНЫЕ И ТРЕХМЕРНЫЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОБОЛОЧЕК

**Ю.В. Клочков[1], О.В. Вахнина[1], А.Ш. Джабраилов[1], Т.А. Соболевская[1], М.Ю. Клочков[2]**
[1]*Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград*
[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*
ovahnina@bk.ru

Для конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния тонких оболочек предлагается использовать двумерные (треугольные фрагменты срединной поверхности) и трехмерные (треугольные призмы) элементы дискретизации. Для улучшения совместности таких элементов на границах их соединений введены множители Лагранжа в дополнительных узлах, расположенных в серединах сторон треугольного элемента и серединах сторон оснований призматического элемента. Тестовые примеры доказали обоснованность применения двумерных элементов с множителями Лагранжа в расчетах однородных оболочек и целесообразность использования трехмерных элементов в зонах сочленений, в расчетах многослойных оболочек и других особых случаях.

**Ключевые слова.** Метод конечных элементов, двумерный элемент дискретизации, трехмерный элемент дискретизации, множители Лагранжа.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Администрации Волгоградской области № 19-41-340005 р_а.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА КОЛЕСА И РЕЛЬСА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ

**А.Я. Коган[1], В.В. Королёв[2], А.А. Локтев[2], А.В. Савин [1], И.В. Шишкина[2]**
[1]*АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Москва*
[2]*Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*
aaloktev@yandex.ru

Настоящее исследование посвящено сравнению результатов использования различных моделей динамического контакта колеса и рельса с учетом множества геометрических, кинематических, динамических параметров воздействия и рельсовой плети, а также дефектов соприкасающихся элементов, что позволяет учесть особенности эксплуатации железнодорожного пути. Предложенный подход к моделированию динамического поведения рельсовой плети и контакта колесо-рельс позволил получить адекватную картину распределения напряжений по поверхности взаимодействия в сравнении с результатами натурных и численных экспериментов.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛОЙНОЙ 3D ПЕЧАТИ С УЧЁТОМ НАЛОЖЕНИЯ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА НЕКОНФОРМНЫХ СЕТКАХ

**Д.А.Коновалов [1], А.В. Вершинин [2], В.А. Левин [2]**
[1]ООО «Фидесис», [2] МГУ имени М.В. Ломоносова,

Примерами верификационных тестовых задач для проверки корректности разработанного алгоритма численного моделирования послойной 3D печати с учетом наложения конечных деформаций на неконформных сетках являются: задача о вставке деформированного цилиндра в недеформированный, обобщающая задачу Ламе-Гадолина на случай конечных деформаций; задача о нелинейном изгибе слоистого бруса с предварительно нагруженными слоями. Также исследуется численная сходимость метода, точность и непрерывность получаемого решения, при наличии неконформной сетки между слоями. Показано, что нелинейные механические эффекты, полученные аналитически, также воспроизводятся в численном решении на конформных и неконформных сетках между слоями. Представленный алгоритм реализован в рамках программного модуля в системе прочностного инженерного анализа CAE Fidesys. В заключении приведены результаты численного моделирования послойной 3D печати с учетом перераспредления конечных деформаций на неконформных сетках между слоями для изделия аддитивного производства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-38-70001.

## МОДЕЛИ ГИПЕРУПРУГОСТИ, ПРОЛОНГИРУЮЩИЕ ЗАКОН ГУКА В ОБЛАСТЬ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЕЛОВ ИХ ПРИМЕНИМОСТИ

**С.Н. Коробейников[1], А.Ю. Ларичкин[1], Т.А. Ротанова[1]**

[1]*Институт гидродинамикиим. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

s.n.korobeynikov@mail.ru

Развиты лагранжевы формулировки линейных изотропных гиперупругих материалов. Эти формулировки основаны на использовании пар сопряженных лагранжевых тензоров напряжений и деформаций. Получены выражения тензоров упругости четвертого порядка для этих моделей материалов. Развитые формулировки определяющих соотношений реализованы в коммерческом пакете конечно-элементного анализа MSC.Marc. Показано, что модель изотропного гиперупругого материала Пельзера наилучшим образом согласует данные экспериментальных зависимостей крутящего момента и увеличения длины стержня от угла закручивания с результатами компьютерного моделирования в задаче о кручении стержня из резиноподобного материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00358 и гранта правительства РФ № Р220-14.W03.31.0002.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ С ТРЕЩИНАМИ

**Р. Л. Лапин[1], В.А. Кузькин[1,2], М.Л. Качанов[3]**

[1] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

[2] *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[3]*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород*

lapruslan@gmail.com

Одной из ключевых задач микромеханики материалов является вычисление эффективных механических свойств материалов, содержащих трещины. Каждая трещина, как правило, моделируются математическим разрезом, поверхности которого свободны от напряжений. При этом нормальная и сдвиговая жесткости трещины оказываются равными. В результате эффективные упругие свойства материалов, содержащих случайно расположенные трещины, ортотропны при произвольной ориентации трещин. Учет контакта между берегами трещин приводит к тому, что нормальная и сдвиговая жесткости могут существенно отличаться, а эффективные свойства перестают быть ортотропными. В настоящей работе предлагается трехмерная модель, позволяющая оценить влияние контактов на продольную и сдвиговую жесткости трещины. Рассматривается бесконечная трещина, берега которой соединены двоякопериодической системой одинаковых контактов. Центры контактов образуют квадратную решетку. Исследуется влияние размеров контакта, формы контактов и расстояния между ними на отношение продольной и сдвиговой податливостей трещины. Податливости определяются численно с использованием метода конечных элементов. Для этого рассматривается ячейка периодичности, содержащая одиночный контакт. Проводится анализ сходимости по сетке. Исследуется влияние высоты ячейки периодичности и формы контакта на отношение податливостей. Показано, что во всех рассмотренных случаях продольная жесткость трещины меньше сдвиговой. Уменьшение высоты контакта приводит к увеличению отношения податливостей. Показано, что форма контакта значительно влияет на данное отношение. Проведено сравнение с аналогичными результатами, полученными в двумерной постановке. Показано, что в двумерном случае отношение продольной и сдвиговой податливостей больше, чем в трехмерном. Однако, характер зависимости отношения от расстояния между контактами одинаков.

## РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПОЭТАПНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЕЛ ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПАКЕТЕ «ФИДЕСИС»

**В.А. Левин[1]**

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

v.a.levin@mail.ru

Обсуждается использование цифрового средства производства «Фидесис» как конечного продукта теории прочности для промышленности. Отмечается, что промышленно реализована теория многократного наложения больших деформаций для всех типов конечных элементов, заложенных в пакете «Фидесис», и метода спектральных элементов для различных определяющих соотношений. Подготовлен прототип программного кода для связанных задач (химические реакции на поверхности, электромагнитные воздействия). Обсуждается возможность моделирования перераспределения конечных деформаций при поэтапном нагружении элементов конструкций, изделий и сооружений при сквозном проектировании, в том числе и для цифровых двойников. Приводятся примеры промышленных расчетов.

## СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОМ ПОЛОМ ЦИЛИНДРЕ ИЗ СПЛАВА Д16Т ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

**А.Е. Либерман[1], В.П. Радченко[2]**

*Самарский государственный технический университет, Самара*

[1]aliberman740@gmail.com, [2]radchenko.vp@samgu.ru

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование влияния локальной стохастической неоднородности деформации ползучести на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полом цилиндрическом образце из сплава Д16Т

при $T$=125°C. Установлено, что в пределах одного образца скорости релаксации остаточных напряжений вследствие неоднородности деформации ползучести отличаются на различных локальных участках более чем в 2 раза.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00550_а.

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЕСТЕСТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ В СИСТЕМЕ AL-CU

**М.Р. Лукманов[1,2], К.С. Назаров[1], Р.Х. Хисамов[1], Л.У. Киеккужина[1,2]**
[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*
dustlm19@gmai.com

Тонкие пластины с чередованием слоев Cu-Al-Cu, деформировали путем кручения под высоким квазигидростатическимдавлением в наковальне Бриджмена на 1,3 и 5 оборотов. Полученные образцыотжигали при температуре 450°C, а затем 500°C в течение 15 мин. С помощью рентгенофазового и энерго-дисперсионного анализа выявлено образование интерметаллидных соединений $Al_2Cu$, $Al_4Cu_9$ и их доля увеличивается с ростом числа оборотов и температуры. С увеличением количества оборотов и температуры значения микротвердости в центре образцов слабо растет, а по краям наблюдается резкий рост микротвердости.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-12-00440.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТЖИГА СТЕКЛО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ СТЕКЛОВАНИЯ

**О.Н. Любимова[1], М.В.Барботько[1]**
[1]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*
berms@mail.ru

Рассматривается математическая модель эволюции технологических и остаточных напряжений при отжиге слоистого композиционного материала на основе стекла и металла, который предлагается как образец при экспериментальных исследованиях сжатых горных пород. Сложность при моделировании обусловлена процессом стеклования в стекле и упруго-пластичным поведением металла.При моделировании структурные и механические релаксационные процессы в стекле рассчитываются по методу Тула-Нарайсвами-Мойнихана-Мазурина, который основан на представлении о структурной температуре, упругое состояние в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния Мизеса.
Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58418X0034

## ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ПОДЛОЖКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

**Б.А. Люкшин [1,2,3], П.А. Люкшин[1], Н.Ю. Матолыгина [1], С.В. Панин [1,4]**
[1] *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,*
[2] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск*
[3] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*
[4] *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*
*lba2008@yandex.ru*

При моделировании термобарьерного покрытия при интенсивном тепловом воздействии последовательно решается ряд задач: теплопроводности, термоупругости, устойчивости, напряженно-деформированного состояния покрытия и подложки после потери устойчивости покрытия.Полученные результаты позволяют сформулировать требования к уровню адгезии термобарьерного покрытия к подложке, обеспечивающему его работоспособность.
Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы по направлению фундаментальных исследований III. 23., а также при поддержке проекта РФФИ № 18-08-00516_а.

## КОМПОЗИТНАЯ ПЛОСКОСТЬ ИЗ ПОЛУЛИНЕЙНОГО МАТЕРИАЛА С МЕЖФАЗНОЙ ТРЕЩИНОЙ, НАГРУЖЕННОЙ РАВНОМЕРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

**Ю.В. Малькова[1],В.М. Мальков[1]**
[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
v.malkov@spbu.ru

Получено аналитическое решение нелинейной задачи теории упругости для композитной плоскости с межфазной трещиной. Упругие свойства моделируются полулинейным материалом. Внешней нагрузкой является нормальное давление на берегах трещины, на бесконечности напряжения отсутствуют. Впервые установлено, что существуют критические давления на берегах трещины, превышение которых ведет к потере устойчивости материала, большим закритическим деформациям и напряжениям. Критические давления имеют порядок модуля сдвига и характерны для низкомодульных эластомеров. Для жестких материалов с большим модулем сдвига критические давления реально не достигаются. Получены формулы, описывающие раскрытие трещины.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИНДЕНТИРОВАНИЮ

**А.А. Маркин[1], Ю.В. Астапов[1]**

[1]*Тульский Государственный Университет, Тула*

markin-nikram@yandex.ru

В работе построена математическая модель неоднородного конечного деформирования нелинейно упругих слабосжимаемых тел.В качестве определяющих соотношений используется обобщение модели материала Генки, полученное удержанием в разложении для удельной потенциальной энергии деформации членов третьего порядка. Константы материала определяются из опыта на одноосное сжатие и используются в дальнейших расчетах. Приведены результаты численного решения задачи о внедрении жесткого штампа сферической формы в цилиндрический образец. Проведена оценка достоверности модели путём сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными, полученными на сконструированной установке. Показано хорошее согласование результатов численного решения с опытными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20053.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЪЕКТИВНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГОРДОНА-ШОУОЛТЕРА В МОДЕЛЯХ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ МАКСВЕЛЛОВСКОГО ТИПА ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

**Е.Д.Мартынова**

[1]*Московский государственный университет, Москва*

elemarta@mail.ru

Рассмотрено определяющее соотношение для вязкоупругих материалов при конечных деформациях, полученное с использованием однопараметрического семейства объективных производных Гордона-Шоуолтера и обобщающее элементарную модель Максвелла. Показано, что указанное определяющее соотношение при любых значениях параметра производной позволяет получить эффект Пойнтинга в задачах о простом сдвиге слоя и кручении стержня неизменной длины из несжимаемых вязкоупругих материалов. Получена лагранжева форма используемых объективных производных в задаче о простом сдвиге, что позволило для любого значения параметра указать в каких базисах эти производные являются просто производными по времени.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В СЛОИСТОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ С ПОЛОСТЬЮ

**Ж.К. Масанов[1], Ж.Т. Кожабеков[1], Г.К. Тугельбаева[1,2]**

[1]*Институт механики и машиноведения им. У.А.Джолдасбекова, Алматы, Казахстан*

[2]*Военный институт Сухопутных войск МО РК, Алматы, Казахстан*

Gk0430@mail.ru, zein04@yandex.ru

В данной работе рассматривается распространения волн в упруго-вязкопластическом слое с полостью, лежащей на упругом основании при воздействии динамической нагрузки со стороны дневной поверхности. В основе решения данной задачи использован метод «распада разрыва» С.К. Годунова.

Работа выполнена при поддержке гранта финансирования по научным проектам № AP05134403.

## НЕКОРРЕКТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МЕХАНИКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД

**В.Е. Миренков, А.В. Савченко**

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия,*

mirenkov@misd.ru

Рассматриваются некорректные задачи при расчете деформирования областей, имеющих угловые точки включая решения для трещин. Предположения вносят погрешность в граничные условия при формулировке проблемы и расширяют класс обратных задач. Некорректность их требует регуляризации или же получения точных уравнений, описывающих напряжения и смещения в квадратурах. Использование численных методов при решении задач Коши расширяет класс некорректных проблем, которые демонстрируют несоответствие математического и физического аспектов задачи. Обсуждается получение корректного решения задачи Коши и упруго пластическая модель трещины.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00533 А.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНОГО ЦИЛИНДРА

**Р.М. Мнухин, В.В. Дударев**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

romamnuhin@yandex.ru

В работе рассмотрена задача об установившихся радиальных колебаниях полого цилиндра с переменными по радиальной координате параметрами Ламе. Определение значений компонент поля перемещения сведено к численному решению набора систем дифференциальных уравнений. Исследована новая обратная коэффициентная задача об определении законов изменения параметров Ламе по данным об амплитудно-частотной характеристике, измеренной на заданном частотном диапазоне. Решение построено на основе итерационного процесса. На каждом шаге искомые поправки определяются численно из сформулированных интегральных уравнений Фредгольма первого рода. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10045.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КИРПИЧЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПУСТОТНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИИ НА СЖАТИЕ

**Д.А. Нижник, И.А. Серебряная, Н.А. Порядина**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

darya.nizhnick@mail.ru

В работе выполнен анализ процесса деформации кирпичей различной пустотности. Исследовано напряжено-деформированное состояние изделий, возникающее при проведении экспериментов в испытаниях на осевое сжатие. Приведена численная реализация данной задачи в программном комплексе конечно-элементного анализаANSYS.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЭЛАСТОСТАТИКИ

**О.С. Новикова[1], В.Б. Пеньков [2]**

[1,2]*Липецкий государственный технический университет, Липецк*

_o_l_g_a_@bk.ru

Полнопараметрические аналитические решения трехмерных задач механики имеют неоспоримые преимущества перед численными. Наработана технология построения таких решений средствами метода граничных состояний. Конкретно разобрано построение аналитического решения для объекта нетривиальной формы (биконус), нагруженного произвольной комбинацией объемных сил двух типов. Построено аналитическое представление напряженно-деформированного состояния и для частного сочетания параметров проиллюстрировано линиями уровня компонент напряжений в осевом сечении тела.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПЬЕЗОУПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

**А.А. Папировский[1], А.В. Лукин [1], И.А. Попов[1]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПБПУ), Санкт-Петербург*

apapirovskiy@gmail.com

Исследуется процесс распространения поверхностных акустических волн во вращающемся пьезоупругом полупространстве. Представлены результаты аналитического и численного решения задачи. Проводится анализ различных волновых параметров, таких как, частота, фазовая скорость, волновые моды и их зависимость от угловой скорости. Полученные результаты могут быть использованы при разработке микромеханических устройств в области навигации и управления движением.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00414 А.

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО В ОПОРНОЙ ПЛИТЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ НЕКОТОРЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

**А.Н. Педенко, А.А. Матросов**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

amatrosov@donstu.ru

Выполнен расчет прочности опорной плиты цифровой антенной решетки, установленной на матче корабля, в случае бортовой качки, рассмотренной по формуле Крылова. Кроме того учтена ветровая нагрузка, действующая на плиту при штормовом ветре. Проанализировано распределение напряжений и деформаций. Установлено, что наибольшим силовым воздействиям подвергаются винтовые соединения. Произведено сравнение полученных результатов со случаем качки по простому синусоидальному закону.

## МЕТОД ГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ: ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**В.Б. Пеньков, Л.В. Левина, Д.А. Иванычев**

*Липецкий государственный технический университет, Липецк*

vbpenkov@mail.ru

Кратко представлена идеология метода граничных состояний. Отмечены его преимущества перед иными методами. Кратко обозначены достигнутые результаты. Подчеркнута эффективность «обвязывания» метода итерационными процессами Шварца и метода возмущений. Очерчены направления развития метода для решения построения полнопараметрических аналитических решений, а также для решения геометрически и физически нелинейных задач механики.

## УПАКОВКА И РАЗВЕРТЫВАНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРУГИХ ШАРНИРОВ

**В.М. Пестренин, И.В. Пестренина, С.В. Русаков, В.Г. Гилев**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

ipestrenina@gmail.com

Рассматриваются составные оболочечные конструкции, элементы которых соединяются гиперупругими шарнирами. Такие шарниры позволяют упаковывать конструкцию и развертывать за счет накопленной упругой энергии в эксплуатационное состояние. Изучается возможность использования в качестве гиперупругих шарниров частично отвержденного препрега. Упругие свойства препрега в зависимости от степени отверждения определяются расчетно-экспериментальным методом. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-41-590649.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСПРЕДЕЛНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПЛОСКОЙ И Ц ИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

**Д.С. Петухов [1], И.Э. Келлер [1,2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

petuhovds@mail.ru

В рамках линейной теории упругости с полем пластических деформаций для случаев пластинки и цилиндрического образца получены выражения поля остаточных напряжений через поле пластических деформаций и наоборот. Получены формулы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций методом Давиденкова: зависимости прогиба от толщины удаленного слоя для пластинки и зависимости диаметра разрезанного кольца от толщины удаленного слоя для цилиндрического образца, а также по данным рентген-дифрактометрического анализа пластинки. Показано, что прогиб содержащей поле пластических деформаций пластинки не зависит от ее ширины.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01085 А.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ НЕКОТОРЫХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ

**Н.А. Порядина, И.А. Серебряная**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

lukinova-n@ya.ru

Представлены результаты статистического анализа выполненных экспериментов, оценивающих влияние опорного трения при проведении стандартных испытаний на осевое сжатие на выходные характеристики прочности керамического кирпича. Проведена проверка статистических гипотез. Определен коэффициент перехода от альтернативного метода к базовому. Определены оптимальные форма и размеры образцов, а также способ подготовки их поверхностей.

## УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ НЕЛИНЕЙНО УПРУГИХ СРЕД В ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ

**Е.И. Рыжак [1], С.В. Синюхина [1]**

[1]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва.*

E_I_Ryzhak@mail.ru

В продолжение работ авторов [1-3], посвященных исследованию устойчивости сред, не имеющих сдвиговой жесткости, исследуются вопросы устойчивости стратифицированных (по направлению действия внешнего поля) сред, обладающих сдвиговой жесткостью. Начальное равновесное поле напряжений (в отличие от возмущающих напряжений) считается гидростатическим. Рассматриваются среды, жестко закрепленные на границе области. Получены достаточные условия устойчивости в зависимости от равновесной стратификации по плотности и от распределения инкрементальных упругих модулей материала. Выявлен стабилизирующий эффект сдвиговой жесткости материала.

## СТАТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

**К.Д.Салямова[1], Х.Х.Турдикулов[1]**

[1]*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН, Узбекистан, Ташкент*

klara_51@mail.ru

Проектирование, строительство и эксплуатация ответственных сооружений, какими являются высокие грунтовые плотины в сейсмоактивных регионах Республики Узбекистан ставит перед исследователями постоянное усовершенствование расчетных методик по оценке их прочности при различного рода нагрузок. На основе разработанной методики численного решения задач статики для грунтовых гидротехнических сооружений решены задачи по определению их напряженно-деформированного состояния при основных нагрузках на примере высокой проектируемой грунтовой плотины Пскемской ГЭС в Узбекистане. Задачи решены в плос-

кой упругой постановке численным методом- методом конечных элементов.При этом учтены конструктивные особенности, неоднородные физико-механические характеристики грунтов, как сооружения, так и его грунтового основания. Произведены расчеты грунтового сооружения при жестком и податливом основании. Результатом решения задач статики явились изолинии перемещений, напряжений в теле сооружения и его основания. Сделан ряд физических выводов. касающихся достижения максимальных значений перемещений и напряжений, а также учета глубины грунтового основания

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ

**А.А. Сафонов[1], М.П. Гусев [1], С.А. Гусев [1], И.В. Сергеичев [1], С.Д. Конев [1], И.Ш. Ахатов [1]**

[1]*Сколковский институт науки и технологий, Центр по проектированию, производственным технологиям и материалам, Москва*

a.safonov@skoltech.ru

В работе изложены методические аспекты моделирования поведения композиционных материалов на основе термореактивного связующего во время изготовления изделий методом пултрузии. Особенность поведения подобных материалов заключается в том, что фазовое состояние матрицы меняется в процессе химической реакции отверждения, что сказывается на механических и температурных свойствах композита в целом. Математическая модель с учетом всех его особенностей реализована в рамках ПП ABAQUS. Приводится пример моделирования и оптимизации пултрузии стеклопластикового стержня диаметром 80 мм.

## ЧИСЛЕНЫЙАНАЛИЗТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ИЗДЕЛИЯ С УЧЕТОМ КОГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

**Л.Р. Сахабутдинова, О.Ю. Сметанников**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

lyaysans@list.ru

В рамках работы разработана численная модель термовязкоупругого поведения изделия в процессе изготовления. Предложен метод моделирования ортотропных вязкоупругих свойств материала оболочки, получаемой методом намотки на основе метода конечных элементов. Осуществлено имитационное моделирование технологического процесса намотки и полимеризации оболочки. Проведен анализвлияния когезионного взаимодействия между формообразующей оправкой и теплозащитным покрытием на основные параметры процесса изготовления композиционной оболочки. Получено распределение контактного давления для оценки зон возможного раскрепления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00903).

## О РЕШЕНИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ВЯЗКОУПРУГОСТИ ИЗОТРОПНОГО НЕСТАРЕЮЩЕГО ТЕЛА НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА

**А.А. Светашков[1], М.С. Павлов[1], А.А. Вакуров[1]**

[1]*Томский политехнический университет, Томск*

svetashkov@tpu.ru

При решении граничных задач квазистатического нагружения линейно вязкоупругих конструкций возникает проблема, обусловленная наличием в системах уравнений равновесия и граничных условий одного или двух интегральных операторов упругой наследственности, вследствие чего уравнения становятся интегро-дифференциальными. В настоящей работе предложен метод, позволяющий избавиться от необходимости нахождения решения интегро-дифференциальных уравнений. Предлагаемый метод основан на замене в уравнениях равновесия и граничных условий упруго-наследственных операторов на некоторые упругие модули, являющиеся функциями времени.

## ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Р.Н. Сергеев[1,2], М.Н. Осипов[1]**

[1]*Самарский университет, Самара*

[2]*АО «РКЦ «Прогресс», Самара*

romansr@yandex.ru,osipov7@yandex.ru

В работе представлен способ повышения чувствительности метода спекл-фотографии при проведении измерений перемещений. Представлены теоритические и экспериментальное обоснование предлагаемого способа. Представлены экспериментальные результаты измерений перемещений по интерференционным картинам постановленных методом Юнга.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00571-а, а также по Программе поддержки технического образования Фонда Арконик номер гранта:18-17с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГОЙ ПЛАСТИНЕ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИН

**Н.В Сергеева, М.В. Вильде**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

sergeevanv@info.sgu.ru

Рассматривается задача о деформировании пластины конечной длины при ударной торцевой нагрузке продольного типа. Задача рассматривается на основе уточненной теории пластин. Вязкоупругие свойства материала описываются наследственно-упругой моделью Работнова. Исследуется процесс распространения и отражения волн в такой пластине. Для решения задачи применяется преобразование Лапласа по времени и ряды Фурье по продольной координате. Получены выражения для напряжения и деформации. Рассмотрено влияние параметров материала на НДС пластины в окрестности квазифронта с учетом отражения волн от краев. Построены графики зависимости деформации от времени.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России №9.8570.2017/8.9.

## ОЦЕНКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

**А.П. Скачков**

Пермский национальный исследовательский университет, Пермь

skachkov@psu.ru

В оптических гироскопах обычно используются канальные волноводы, созданные в исходных кристаллах. Получение таких каналов сопровождается серией химических реакций с последующей термической обработкой для повышения их стабильности. Качество технических характеристик волноводов определяется параметрами указанных воздействий. В работе представлены результаты экспериментов по выявлению зависимости между этими технологическими параметрами и микромеханическими характеристиками (микротвердось, приведенный модуль) волновода. Полученные результаты позволят в дальнейшем осуществлять технический контроль процесса производства изделий**.**

## САМООРГАНИЗОВАННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР КАК МЕХАНИЗМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИИ

**М.А. Соковиков [1], М.Ю. Симонов [2], В.В. Чудинов [1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

sokovikov@icmm.ru

Данные проведенных экспериментальных исследований на стержне Гопкинсона-Кольского и при пробивании преград с использованием инфракрасной термографии, изучение структуры деформированных образцов, а также данные численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов.

Работа выполнена при частичной поддержки грантов РФФИ 17-08-00905_а, 17-41-590149 р_а, 16-48-590534 р_а, 18-08-01186_а.

## ВАРИАНТ МОДЕЛИ ГЕНКИ ДЛЯ ИЗОТРОПНЫХ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

**М.Ю. Соколова[1], Ю.В. Астапов [1]**

[1]*Тульский государственный университет, Тула*

socolova-m-u@yandex.ru

Предложена нелинейная модель изотропного упругого материала, являющаяся обобщением модели Мурнагана, в которой использовано разложение удельной потенциальной энергии деформаций в ряд по степеням тензора логарифмических деформаций Генки. Определен физический смысл констант, входящих в полученные соотношения. Записан двухконстантный упругий потенциал для несжимаемого материала, учитывающий зависимость напряжений от угла вида деформированного состояния. Из экспериментов на сжатие определены значения констант, входящих в этот потенциал. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20053.

## УТОЧНЕННАЯ АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЛАНАРНОЙ КРАЕВОЙ ВОЛНЫ В ТОНКОЙ ПЛАСТИНЕ

**М.Ю. Сурова, М.В. Вильде**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

mzhilko@yandex.ru, mv_wilde@mail.ru

Рассматривается задача о распространении волн в полубесконечной тонкой пластине, возбуждаемых продольным усилием, приложенным на торце. Для описания колебаний пластины применяется уточненная теория растяжения-сжатия пластин

с приведенной инерцией, позволяющая расширить рамки применимости двумерной теории в задачах данного типа. Предложена уточненная асимптотическая модель, позволяющая выделить поле планарной краевой волны.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКОГО ЭЛЕМЕНТА С ПЕРФОРАЦИЕЙ

**М.В. Табанюхова**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск*

m.tabanyukhova@sibstrin.ru

Представленырезультаты исследования напряжённого состояния пластины, имеющей регулярные вырезы. Испытания проводились при простых видах сопротивления – осевое сжатие и прямой поперечный изгиб. С помощью поляризационно-оптического метода в плоском элементе, выполненном из пьезооптического материала, получены картины полос интерференции. Их качественный анализ выявил местоположение точек с высокой концентрацией напряжений. Расшифровка экспериментальных данных позволила определить наибольшие по модулю касательные напряжения, которые возникают в опасных точках. Построены эпюры касательных напряжений, определены коэффициенты концентрации напряжений.

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ И СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

**Т.В. Третьякова[1]**

[1]*Центр экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), Пермь*

cem.tretyakova@gmail.com

Работа посвящена экспериментальному исследованию закономерностей пространственно-временной неоднородности пластического течения конструкционных металлов и сплавов при сложном напряжённом состоянии и сложном нагружении на основе анализа эволюции неоднородных полей деформаций и температур. Реализованы механические испытания на одноосное растяжение, кручение и при совместном растяжении с кручением тонкостенных трубчатых образцов без и с одиночным отверстием из углеродистой стали и Al-Mg сплава. Проведен анализ кинетики инициирования и распространения деформационных полос Чернова-Людерса в условиях сложного НДС.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-00242.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА СИНГУЛЯРНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КЛИНА СО СВОБОДНЫМИ ОТ НАПРЯЖЕНИЙ ГРАНЯМИ И ДЛЯ ЗАМКНУТОГО КЛИНА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.Ю. Фёдоров**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

fedorov@icmm.ru

В настоящей работепроведён анализ сингулярных решений в окрестности двух типов особых точек: вершина однородного клина со свободными от напряжений гранями и вершина замкнутого составного клина, состоящего из двух различных материалов. Сравнительный анализ позволил обнаружить новые интересные результаты, которые могут быть полезны в практических приложениях для снижения концентрации напряжений в устье трещин, путём введения дополнительного материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-00243.

## АПОСТЕРИОРНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

**М.Е. Фролов[1], О.И. Чистякова[1], М.А. Чурилова[1]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

frolov_me@spbstu.ru

В докладе представлены последние результаты, касающиеся апостериорного контроля точности приближенных решений в плоских и пространственных задачах линейной теории упругости. Все обсуждаемые апостериорные оценки основаны на функциональном подходе, привлекающем строгие математические методы функционального анализа и теории уравнений в частных производных. Аспекты практической реализации подхода и построения адаптивных алгоритмов рассматриваются на примере плоских задач.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МД-1071.2017.1).

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА НА ОСНОВЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ С КОНЕЧНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Ф.С. Хайруллин [1], О.М. Сахбиев [2]**

*[1,2]Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань*

*[1] x_farid@mail.ru, [2]somkazan@yandex.ru*

На конкретных примерах продемонстрированы возможности вариационного метода расчета трехмерных конструкций на основе функций с конечными носителями произвольного порядка аппроксимации, изложенного в работах авторов. Показано, что данный метод позволяет производить расчеты конструкций, у которых один или два геометрических размера намного меньше остальных, т.е. достаточно тонких оболочек и стержней. На основе полученных данных показаны пределы применимости теории оболочек и теории стержней.

## МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОЙ УПРУГОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ И ЕЕ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

**Д.В. Христич[1], М.Ю. Соколова[1]**

[1]*Тульский государственный университет, Тула*

dmitrykhristich@rambler.ru

Рассмотрен общий подход к построению нелинейных вариантов связи напряжений и деформаций в анизотропных материалах с различными типами симметрии свойств. Этот подход основан на понятии упругих собственных подпространств анизотропных материалов и на обобщении частичного постулата изотропии. Предложены варианты нелинейных определяющих соотношений для анизотропных материалов, записанные в пространстве напряжений. Проведено сравнение расчетов с использованием предложенных соотношений с экспериментальными данными по растяжению пластин из слоистых композитов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20053.

## СТАТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

**И.Г. Шайхутдинов**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ, Казань*

ilyaz.shaykhutdinov@mail.ru

При отсутствии объемных сил напряжения и деформации в произвольной ортогональной системе координат удовлетворяют одинаковым дифференциальным уравнениям при любых напряжениях и малых деформациях. Все нормальные и несимметричные касательные напряжения могут быть выражены через три произвольные функции, которые тождественно удовлетворяют уравнениям равновесия. Если вращение отсутствует, то эти функции могут быть выражены через одну, лапласиан которой является постоянной. При упомянутых обоих условиях объемная деформация также постоянна во всей области.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕЩИН В СТЕРЖНЕ С ПОМОЩЬЮ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Е.И. Шифрин[1], И.М. Лебедев [1]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

shifrin@ipmnet.ru

Рассматриваются задачи идентификации множественных поперечных трещин в стержне по собственным частотам как продольных, так и поперечных колебаний. Разработаны методы идентификации числа и положения трещин в стержне по двум спектрам, отвечающим продольным колебаниям, и по трем спектрам, отвечающим поперечным колебаниям. Разработанные методы основаны на минимизации целевой функции, характеризующей отличие между заданными (измеренными) и вычисляемыми в ходе реализации алгоритма собственными частотами. Минимизация целевой функции осуществляется с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта. Рассмотрены численные примеры. Исследована устойчивость получаемых результатов к шуму в исходных данных.

Работа выполнена по теме государственного задания № госрегистрации АААА-А17-117021310386-3, а также при поддержке РФФИ проект № 19-01-00100.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

**В.О. Юров**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

vitja.jurov@yandex.ru

Исследованы волновые процессы в неоднородном по радиальной координате цилиндрическом волноводе при произвольном виде неоднородности. Получены асимптотические формулы, описывающие ветви дисперсионного множества в окрестности частотной оси квадратичными функциями. При численной апробации исследованы несколько моделей материалов. Проанализировано влияние полей предварительных напряжений и граничных условий импедансного типа на дисперсионное множество и волны в волноводе. Краевая задача в трансформантах Фурье решена численно методом пристрелки. Проведен анализ волновых полей на поверхности цилиндра, изучено влияние различных факторов на его структуру.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00069.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

**Я.Н. Юферева[1], Л.Б. Маслов[1,2], С.В. Фомин[1]**

[1]*Вятский государственный университет, Киров*

[2]*Ивановский государственный энергетический университет, Иваново*

yanayufereva@gmail.com

Способность материалов проявлять различные свойства, определяет их область применения. Благодаря тому, что резины, как конструкционный материал, способны подвергаться многократным обратимым деформациям сохраняя при этом долгое время необходимые свойства, определяет область исследования механических свойств данных материалов. В работе описаны экспериментальные исследования деформационных свойств модульных резин, основу которых составляют каучуки СКИ-3, СКМС-30-АРКМ-15. На основе полученных экспериментальных кривых, приведены результаты расчета коэффициента поглощения (относительного гистерезиса) при действии циклических деформаций. Представлены значения эластичности по отскоку. Показана зависимость значений относительного гистерезиса от типа каучука и его молекулярного строения.

## ТРЕХМЕРНЫЙ КВАТЕРНИОННЫЙ АНАЛОГ ФОРМУЛ КОЛОСОВА-МУСХЕЛИШВИЛИ ДЛЯ БЕСКОНЕЧНОГО ПРОСТРАНСТВА С ПОЛОСТЬЮ

**А.М. Яковлев, Ю.М. Григорьев**

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск*

andrewyakovlev1994@gmail.com

Введен оператор радиального интегрирования для бесконечной области с полостью, а также приложение этого оператора для получения трехмерного кватернионного аналога формул Колосова-Мусхелишвили, выраженного через две произвольные регулярные кватернионные функции. Представлен примерв использования этого кватернионного аналога для решения задачи теории упругости для бесконечного пространства с шаровой полостью.

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ С ВНУТРЕННИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЁМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА, ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ С ПОМОЩЬЮ CAE FIDESYS

**М.Я. Яковлев[1,2], К.М. Зингерман [3], В.Ан. Левин [1]**

[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, механико-математический факультет, Москва*

[2]*ООО «Фидесис», Москва*

[3]*ООО Тверской государственный университет, Тверь*

yakovlev@cae-fidesys.com

В докладе представлен подход к оценке эффективных механических свойств материалов изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий (3D-печати), и некоторые результаты такой оценки. Одной из особенностей аддитивного материала является наличие в нём конечных внутренних температурных напряжений и деформаций, возникающих при изготовлении изделия путём печати на 3D-принтере. Эффективные свойства оцениваются с учётом этого, с помощью серии расчётов на представительном объёме материала с помощью CAEFidesys. Результаты каждого расчёта осредняются по объёму, что позволяет оценить эффективные свойства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-38-70001 и частично при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения №14.577.21.0271.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК УФ ОТВЕРЖДАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ

**А.Н. Труфанов[1]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

ant@pstu.ru

Методами численного и натурного экспериментов исследованытермомехнические свойства УФ отверждаемых полимерных покрытий для оптического волокна. Выполнена постановка и проведена серия экспериментов на динамическом механическом анализаторе, получены дискретные зависимости комплексного модуля от температуры и частоты. Методом Нелдера-Мида решена задача многопараметрической оптимизации и построены определяющие соотношения для защитно-упрочняющих покрытий, позволяющие описывать термомеханическое поведение рассматриваемых стеклующихся материалов в широком диапазоне температур, включающем релаксационный переход. Найденные определяющие соотношения верифицированы экспериментами на ползучесть.

## ПОВОРОТ ОСЕЙ АНИЗОТРОПИИ УПРУГОЙ ОРТОТРОПНОЙ СРЕДЫ И СОГЛАСОВАННЫЙ С НИМ ТЕНЗОР ДЕФОРМАЦИЙ

**И.Ю. Зубко**[1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

zubko@pstu.ru

Предложена новая коротационная производная для записи упругого закона в скоростной форме. Поворот осей анизотропии введен с помощью разгруженной конфигурации,однозначно определяемой как наиболее близкой к текущей с помощью минимизации интегральных перемещений.Получены точные решения для угла и оси поворота осей анизотропии. Тензор спина найденного поворота используется для определения эйлерова тензора деформаций, энергетически сопряженного взвешенному тензору напряжений Кирхгофа. Полученный тензор деформаций не входит в семейство тензоров деформаций Хилла-Сетха.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01292.

## К ТЕОРИИ ТОЛСТЫХ ПЛАСТИН С УЧЕТОМ БИМОМЕНТОВ

**М. К. Усаров [1], Д. М. Усаров [1]**

[1]*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, Ташкент*

umakhamatali@mail.ru

Работа посвящена усовершенствованию теории толстых пластин с учетом не только сил и моментов, но и бимоментов, которые появляются при учете нелинейности закона распределения перемещения по толщине пластины и ее компонентов тензора деформации и напряжений. Выражения силовых факторов, уравнения движения толстой пластины и граничные условия строятся в рамках трехмерной динамической теории упругости.

Работа выполнена при поддержке гранта РУз № ФА-Ф-4-007.

## Подсекция III-2. ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

### МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

**Х. Х. Азметов [1,2], Ю.М. Темис [1,2], А.Д. Худякова [1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

ymtemis@ciam.ru

Рассмотрены варианты моделей, которые могут применяться при описании упругопластического поведения материала деталей ГТД, работающих в условиях неизотермического циклического нагружения: трехпараметрическая модель одноосного циклического деформирования и модели пластического течения. В качестве теоретической основы для построения моделей пластического течения предложено использовать инвариантную теорию пластичности. Показано, что использование полной системы инвариантов не изменяет общую структуру соотношений инвариантной теории пластичности. Приведены результаты моделирования процессов деформирования по термомеханическим траекториям, близким к рабочим.

### ИТЕРАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ЛАМЕ

**С.Е. Александров[1], В.И. Бухалов[1], А.Л. Попов[1,2]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[2]*Московский государственный строительный университет, Москва*

vlad.buhalov@yandex.ru

Известно, что решение задачи Ламе можно рассматривать как в упругой, так и в упругопластической постановке. В данной работе представлен итерационный метод решения упругопластической задачи Ламе для цилиндра, нагруженного под действием равномерного внешнего давления. Отличие данного подхода состоит в том, что решение упругопластической задачи Ламе находится с использованием упругого решения и аналитического представления напряжений в пластической области. Сходимость итерационного метода показана в сравнении с известным решением данной задачи в упругопластической постановке. Проведен также численный расчет упругопластической задачи Ламе с использованием итерационного решения и приведены сравнения с аналитическими результатами.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310386-3).

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗРЫХЛЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**А.Р. Арутюнян[1], Р.А. Арутюнян[1], Р.Р. Саитова[1]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

a.arutyunyan@spbu.ru, rigastr@yandex.ru

В условиях высокотемпературной ползучести происходит эволюция поврежденности металлических материалов. Для ее описания используется концепция поврежденности Качанова-Работнова. Параметр поврежденности определяется какотносительноеизменениеплотности материала, которая являетсяинтегральнойхарактеристикой поврежденности. С учетом этого параметра и закона сохранения массы сформулированы взаимосвязанные кинетические уравнения для деформации ползучести и параметра поврежденности. Получены аналитические решения этих уравнений и сформулирован критерий длительной прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 18-01-00146.

### КРУЧЕНИЕ ОРТОТРОПНОГО ТОНКОСТЕННОГО КРУГЛОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

**И.А. Банщикова**

*Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

binna@ngs.ru

Смоделировано кручение круглых тонкостенных стержней из ототропного при ползучести материала. Полученные нижняя и верхняя оценка скорости угла закручивания на основе принципов минимума полной мощности и дополнительного рассеяния удовлетворительно согласуются с результатами численного моделирования в программе Ansys.

### К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ПО КИНЕТИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЯМ СО СКАЛЯРНЫМ ПАРАМЕТРОМ ПОВРЕЖДЁННОСТИ

**И.А. Банщикова**

*Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

binna@ngs.ru

На основе кинетических уравнений ползучести проведено сравнение накопления повреждений при растяжении стержней для двух режимов деформирования: под действием постоянных напряжений и при постоянных скоростях деформаций, соответствующих скоростям на установившейся стадии ползучести для тех же напряжений. Получено, что с точки зрения сохранения остаточного

эксплуатационного ресурса на стадии изготовления формование до необходимой величины деформации с заданной кинематикой предпочтительнее, чем под действием постоянных напряжений для материалов, у которых на семействе диаграмм «деформация-время при σ=const» деформация при разрушении монотонно уменьшается при увеличении напряжения.

## ПОЛЗУЧЕСТЬ И ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДИСКЕ

**А.С. Бегун[1], А.А. Буренин [2]**

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток*

[2] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре*

asustinova@mail.ru

Изучается деформирование вращающегося диска с изменяющейся скоростью в условиях ползучести и вязкопластического течения. В рамках теории течения получены дифференциальные уравнения, позволяющие рассчитать поля напряжений, деформаций, перемещений и скоростей с использованием конечно-разностных схем. Проведены расчеты для различных потенциалов ползучести и пластичности. Получены закономерности развития областей вязкопластического течения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-01-00038-А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ И ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН58МБЮД

**А.А. Бикмухаметова [1,2], Э.В. Галиева [1],В.А. Валитов [1], И.Ш. Валеев [1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*УГАТУ - Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

*BikmukhametovaAA@mail.ru*

Показано, что радиально-сдвиговая прокатка обеспечивает формирование в прокатанной заготовке из сплава ХН58МБЮД градиентной структуры, монотонно изменяющейся по сечению прутка от крупнозернистой (КЗ) в центре до ультрамелкозернистой (УМЗ) в периферийной зоне. Такое градиентное уменьшение размера зерен в поперечном сечении прутка от КЗ (34,1 мкм) до УМЗ (2,4 мкм) приводит к градиентному увеличению микротвердости от 3,3 до 5,4 ГПа. Определены режимы горячей листовой прокатки, позволяющие преобразовать исходную КЗ структуру в УМЗ структуру дуплексного типа (γ+δ).

Работа по РСП выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685, а по листовой прокатке по госзаданию №АААА-А17-117041310215-4.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

**К.С. Бормотин[1], Вин Аунг[1]**

[1]*ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», Комсомольск-на-Амуре*

cvmi@knastu.ru, winnaung53@gmail.com

Рассматриваются задачи моделирования процессов формообразования панелей с помощью реконфигурируемого стержневого пуансона в условиях ползучести и обтяжного пресса в условиях пластичности. Задачи неупругого деформирования решаются методом конечных элементов. Вводятся критерии оптимизации процессов деформирования, которые обеспечивают минимальную поврежденность и максимальные остаточные деформации. Формулируется дискретная задача оптимального управления, которая решается методом динамического программирования. Алгоритмы, реализованные в MSC.Marc, позволяют вычислить оптимальные законы работы реконфигурируемого стержневого пуансона и обтяжного пресса.

Работа выполнена при поддержке совета по грантам Президента РФ (МД-4117.2018.1).

## ОБЪЕКТИВНЫЕ ТЕНЗОРЫ И НЕЗАВИСИМЫЕ ОТ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА ОТОБРАЖЕНИЯВ МЕХАНИКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

**Г.Л. Бровко**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

glb@mech.math.msu.su

Введены понятия объективных тензоров всевозможных рангов и типов, и фундаментальное понятие независимости отображений объективных тензорных процессов от системы отсчета, присущее определяющим соотношениям различных физических и механических свойств в ньютоновом подходе. Предложены обобщенныепонятия объективныхпроизводныхи объективного интегрирования. Построены новые классы тензорных мер напряжений и конечныхдеформаций. Предложеныаксиомы и построен вариант общей теории определяющих соотношений механических свойств сплошных сред. Отмечены приложения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00669.

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЛСТОСТЕННОЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПРИ НАГРЕВЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОСТЫВАНИИ

**А.А. Буренин[1], А.В. Ткачева[1]**

[1]*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*

4nansi4@mail.ru

На примере одномерной задачи о нагреве толстостенной трубы по ее внутренней поверхности указаны особенности расчетов изменяющихся температурных напряжений при использовании классических кусочно-линейных условий пластического течения с пределом текучести, зависящим от температуры. Расчеты проводятся последовательными шагами по времени в рамках теории температурных напряжений, когда производством тепла за счет деформирования пренебрегают. Показано, что в расчетах напряжений, обратимых и необратимых деформаций имеется возможность получить конечные зависимости, связывающие их с распределенбием температуры и таким способом обойтись без дискретизации расчетных областей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ№ 17-01-00507 А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАССЧЕТНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

**Н.В. Буртелова, А.А. Быков, В.С. Молчанов**

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

Aleks-Bykov@yandex.ru, burtelova031@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментального определения поля перемещений в шейке образца из стали 07Х16Н6, и основанная на численном моделировании верификация различных моделей пластического течения. Томографические исследования показали, что внутри образца возникает большое количество дефектов с характерным размером 2,7 мкм и более. В результате для лучшего совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными, модели пластичности для указанной стали должны допускать некоторое увеличение объема при пластическом деформировании.

## ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**В.А. Валитов**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

Galieva_elvina_v@mail.ru

Исследованы закономерности формирования при деформационной обработке ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в никелевых сплавах, различающихся по химическому и фазовому составу. Показано, что формирование УМЗ структуры (менее 1мкм) позволяет реализовать эффект низкотемпературной сверхпластичности (НТСП) в деформируемых никелевых сплавах типа ЭП962, ЭП975, ЭК79 и гранульном сплаве ЭП741НП. Изучена НТСП сплавов типа Inconel 718 и ЭК61 с нанокристаллической структурой.

Исследования по сплавам ЭП975, ЭК79, ЭК61 и ЭП741НП с УМЗ структурой выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685, а по сплавам с микродуплексной структурой в рамках Госзадания ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310215-4.

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

**В.И. Ванько**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

vvanko@mail.ru

Изучаются процессы деформирования элементов конструкций и оценивается их несущая способность по уровню максимальной нагрузки или “времени жизни” (при учёте эффекта ползучести): исследуется продольный изгиб шарнирно опёртого упругопластического стержня в соответствии с концепциями Кармана и Шэнли; принятая кинематическая схема позволила проследить процесс деформирования цилиндрических оболочек (бесконечной и конечной длин) под внешним гидростатическим давлением вплоть до полного сплющивания поперечного (срединного для оболочки конечной длины) сечения.

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПИСАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ЛОКАЛЬНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

**Р.А. Васин[1], О.И. Быля [2]**

[1]*Институт механики МГУ, Москва*

[2]*University of Strathclyde, Glasgow*

ra.vasin@yandex.ru

Процессы с локальным деформированием позволяют получать большие деформации даже для сплавов с ограниченной пластической деформацией при минимальных нагрузках. Однако это достигается за счет высокой сложности механики процесса. Выбор режима деформирования для получения изделия без разрушения и дефектов связан с решением сложной нестационарной краевой задачи, в которой присутствует циклическое нагружение, постоянное перемещение очага деформации. Доклад посвящен исследованию подходов к решению этой задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01375.

## ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

**Д.И. Вичужанин[1], С.В. Смирнов[1]**

[1]*Институт машиноведения, Уральское отделение РАН, г. Екатеринбург*

mmm@imach.uran.ru

Предложен процесс деформационно-термической обработки сдвигом под давлением металломатричного композита Al/SiC с содержанием частиц SiC 10 об.%. Основной особенностью процесса является то, что исследуемый композит деформируется при повышенной температуре в стальной оболочке.При этом в композите возникают значительные сжимающие напряжения (мягкое напряженное состояние). По результатам испытаний на растяжение и сжатие образцов после деформационно-термической обработки установлено значительное увеличение прочностных и пластических свойств композита.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИМАШ УрО РАН (тема АААА-А18-118020790145-0).

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ХН58МБЮД С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

**Э.В. Галиева, Р.Я. Лутфуллин, В.А. Валитов, П.А. Классман, М.И. Нагимов**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

Galieva_elvina_v@mail.ru

Показана эффективность применения методов горячей листовой прокатки и всесторонней изотермической ковки (ВИК) для получения ультрамелкозернистой структуры дуплексного типа в сплаве ХН58МБЮД. После обоих видов обработки сплав проявляет признаки низкотемпературной сверхпластичности. В прокатанном сплаве ХН58МБЮД относительное удлинение достигает максимального значения при температуре 800 °С и составляет 845%. В кованном материале значение относительного удлинения при аналогичных условиях испытаний были выше (1430÷1560%).

Работы по ВИК выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685, а по листовой прокатке в рамках госзадания ИПСМ РАН (№ гос. рег. АААА-А17-117041310215-4).

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОНТЕЙНЕРА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВКИ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМОГО ГРАНУЛЬНОГО СПЛАВА ЭП741НП

**А.А. Ганеев, В.А. Валитов, А.Х. Ахунова, Ф.З. Утяшев**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

artem@imsp.ru

Методом конечно-элементного моделирования показано, что при одноосном сжатии заготовки из сплава ЭП741НП, наиболее эффективной является конструкция контейнера из стали 12Х18Н10Т, включающая подкладки и укороченную обойму высотой, равной конечной высоте деформированной заготовки. Такая конструкция контейнера, приводит к смещению торцевых застойных зон от заготовки в подкладки, повышению однородности распределения полей деформации, а также снижению растягивающих напряжений вблизи боковой поверхности заготовки.

Моделирование проведено при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685,а экспериментальные данные для моделирования получены по госзаданию № АААА-А17-117041310215-4.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ.

**А.Л. Григорьева [1], Я.Ю. Григорьев [1], А.И. Хромов[1], И.В. Канашин[1]**

[1]*ФГБОУВО Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре*

grigoreva.al@email.knastu.ru

В данной работе были получены аналитические решения полей тензоров деформации при одноосном растяжениижесткопластической полосы в условиях плоского напряженного состояния. Актуальность построения данных решений связана с существенными трудностями, при определении полей деформаций численными методами (например, методом конечных элементов). При построении данных решений было учтено изменение геометрических характеристик полосы (толщина, ширина), что привело к решению нелинейной задачи механики сплошных сред.

## МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ СЛОЖНОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**А.И. Грищенко[1], А.С.Семенов[1], Л.Б. Гецов[2]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

[2]*ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург*

gai-gr@yandex.ru

Применение монокристаллических сплавов при изготовлении рабочих и сопловых лопаток позволяет значительно увеличить рабочую температуру газотурбинных двигателей, что приводит к повышениюих эффективности, экологичности и экономичности. В работе представлены результаты моделирования процессов высокотемпературной ползучести монокристаллических сплавов на

никелевой основе с учетом изменения стуктурно–фазового состояния. Проведен анализ влияния фазового γ-γ'состава на кривые ползучести. Средствами прямого конечно-элементного моделирования исследовано влияния эволюции формы включения γ'-фазы при рафтинге на скорость ползучести.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-01252.

## ВАРИАНТ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ МКЭ В СМЕШАННОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ

**Н.А. Гуреева, Р.З. Киселева, Ю.В. Клочков, А.П. Николаев**
*Волгоградский государственный аграрный университет,Волгоград, Россия*
natalya-gureeva@yandex.ru

При определении напряженно-деформированного состояния нелинейно деформируемых оболочек методом конечных элементов широко распространена шаговая процедура нагружения. Соотношения между приращениями напряжений и приращениями деформаций получены на основе гипотезы о пропорциональности компонент девиатора приращений пластических деформаций компонентам девиатора приращений напряжений. Матрица деформирования формируется на основе функционала о равенстве действительных и возможных работ внешних и внутренних сил на шаге нагружения. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Администрации Волгоградской области № 19-41-340004 р_а.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕПРЕРЫВНОЛИТОМ СЛИТКЕ

**М.П. Гусев [1], Д.И. Чебаков [1], С.В. Зарубин [2], А.М. Лонгинов [3], И.К. Ужинский [1]**
[1] *Сколковский институт науки и технологий, Москва*
[2] *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*
[3] *ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Москва*
m.gusev@skoltech.ru

В работе представлены основы численного моделирования термомеханических процессов в непрерывнолитом слитке. Расчет производится комбинированием решения задачи нестационарного распространения тепла и расчетом нелинейных деформаций ползучести на основе полей температур. Граничные условия тепловой задачи определяются из решения функциональной модели системы охлаждения слитка зоны вторичного охлаждения. Разработаны критерии развития и распространения дефектов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

**Е.Е. Деревянка[1], В.П. Радченко[2]**
*Самарский государственный технический университет,Самара*
[1]derevyanka.ee@samgtu.ru, [2]radchenko.vp@samgtu.ru

Разработан метод моделирования процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах статически неопределимых систем в условиях ползучести. Для разработанного метода численного расчёта создан программный комплекс, при помощи которого выполнен модельный расчёт трёхэлементной несимметричной упрочнённой статически неопределимой стержневой системы из сплава ЖС6У при температуре Т=675°С. Получены зависимости кинетики всех компонент тензора остаточных напряжений во всех стержнях системы, выполнен сравнительный анализ скоростей релаксации остаточных напряжений в различных стержнях. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00550 А.

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ ДВУМЕРНОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ УПРУГОСТИ

**А.Ш. Джабраилов**
*Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград*
arsen82@yandex.ru

В настоящей работе рассматривается алгоритм расчета оболочечной конструкции произвольной формы с учетом физической нелинейности применяемого материала. При определении параметров напряженно-деформированного состояния использовалась шаговая процедура нагружения. На основании анализа полученных результатов показана высокая эффективность описанного метода.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Администрации Волгоградской области № 19-41-340002.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ ФОРМОВКИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

**И.Ю. Захарьев[1]**
[1]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*
Ivan.Zakhariev@gmail.com

Разработка режимов для изготовления деталей сложной формы методом сверхпластической газовой формовки осуществляется с применением метода конечных элементов. Тип используемого элемента может влиять на результаты моделирования. В данной работе исследуется влияние выбора типа конечного элемента на распределение материала по заготовки после окончания формовки

листовой заготовки в цилиндрическую матрицу. В рамках исследования рассматривались материалы с различным коэффициентом скоростной чувствительности.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ПЛОСКИМ МНОГОЗВЕННЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

**В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев, В.И. Гультяев**

*Тверской государственный технический университет, Тверь*

alexeew@bk.ru

Представлены основные уравнения теории процессов пластического деформирования материалов в плоских задачах и математическая модель для многозвенных кусочно-ломаных траекторий. Для оценки достоверности модели результаты расчета сопоставлены с результатами физического эксперимента, проведенного на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ. Показано, что модельные данные качественно и количественно описывают основные эффекты сложного упругопластического деформирования материала для данного класса траекторий.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАДИЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА Al–Mg

**А.В. Иляхинский, В.М. Родюшкин**

*ИПМ РАН, Нижний Новгород*

vlkn2005@yandex.ru

Для количественного анализа деформационных кривых в условиях неустойчивости пластического течения в работе используется статистический подход. Экспериментально изучено влияние скорости деформации образцов сплава AJ-Mg на характер кривых деформации. Предложено использовать статистический анализ для выявления скрытого порядка в нерегулярных вариациях деформирующего напряжения, скачкообразная деформация которых определяется различными физическими механизмами. Получены данные о поведении параметра самоорганизации деформационных процессов, характеризующие эффект Портевена - Ле Шателье. Работа выполнена по теме государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. № 0035-2014-0402 (№ госрегистрации 01201458047) и при поддержке гранта РФФИ №18-08-00715А и № 19-08-00965.

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ТЕОРИИ РАБОТНОВА

**А. Искакбаев [1,2], Б.Б. Телтаев [1], Г.М. Енсебаева [2], К.С. Кутимов [2], Б.Д. Абу [1]**

*[1] Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Алматы, Казахстан*

*[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

gulzat-y83@list.ru, kiyas6@mail.ru

В работе выполнен анализ процесса ползучести и релаксации материалов на основе нелинейной наследственной теории Работнова. Выполнено испытание асфальтобетона при прямом растяжении при разных напряжениях и температурах.Для определения характера (линейность или нелинейность) деформирования наследственных материалов был предложен новый метод с введением так называемого экспериментального реологического параметра. Предложены новые эффективные методики определения параметров ползучести: $\varepsilon_0$, $\alpha$, $\delta$, $\lambda$ и $\beta$.По предложенной методике был описан процесс ползучести ряда наследственных материалов и были построены соответствующие кривые релаксации.

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ

**С.Ю. Ишбулатов[1], А.В. Вершинин[2], Мясников[1]**

*[1]Сколковский институт науки и технологий, Москва*

*[2]Московский государственный университет, Москва*

salavat.ishbulatov@skoltech.ru

Описана физико-математическая постановка задачи численного эксперимента одноосного сжатия образца. Рассмотрены различные граничные условия и их влияние. Проведен ряд экспериментальных вычислений на ПО, реализующим МКЭ и МСЭ. Представлен сравнительный анализ расчета упругопластичных эффективных свойств образца с круговыми включениями с учетом и без учёта геометрической пластической нелинейности по картам зонального распределения пластической деформации, зависимостей инженерной деформации от напряжения. Выполнена валидация и верификация, анализ сеточной сходимости.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ГОЛОВКИ ПУТЕВОГО ШУРУПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

**А.С. Ишимов[1], М.П. Барышников [1], А.М. Барышникова [1]**

*[1]Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск*

ttsoprano.a@gmail.com

На сегодняшний день, в России, отсутствует производство железнодорожного крепежа используемого при строительстве высокоскоростных железных дорог. В связи с чем, актуальной задачей становится исследование процесса горячей штамповки данного вида крепежа. На основании математического анализа экспериментальных зависимостей напряжения текучести от параметров де-

формирования, таких как, скорость, температура, степень деформации, получена математическая модель описывающая реологические свойства стали 20, с учетом процесса динамической рекристаллизации, в диапазоне температур от 1200 $^{o}$C до 900 $^{o}$C, и скоростей деформации от 0,01 $c^{-1}$ до 5 $c^{-1}$. Полученная математическая модель была использована, при конечно-элементном анализе процесса горячей штамповки прямоугольной головки путевого шурупа, для расчета уровня напряжений на каждом шаге расчета.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩИХСЯ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ

**С.В. Иявойнен**

*Институт гидродинамики им М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

svetaiyavoynen@gmail.com

В авиастроении, космосе используются металлические оребренные панели. Элементы её состоят из частей балок таврового сечения. В работе рассмотрено моделирование процессов деформирования балок таврового сечения при чистом изгибе. Модели учитывают разные свойства материалов в процессе ползучести при растяжении и сжатии, учёт повреждаемости, а также влияние температурой выдержки. На основе серии прямых задач решена обратная задача по поиску изгибающего момента по кривизне балки. При решении использовался метод оптимизации Нелдера-Мида.

## МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ, РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОМ

**И.Э. Келлер[1,2], А.А. Адамов[1], Д.С. Петухов[1,2], А.В. Казанцев[2], В.Н. Трофимов[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

kie@icmm.ru

Излагаетсяметодика и результаты экспериментальной идентификации модели пластического деформирования и разрушения анизотропной листовой сталив процессах холодной листовой штамповки. Обсуждаются условия возникновения дефектов изделий, вызываемых локализацией пластической деформации и гофрообразованием, особенности использования для этого диаграммы предельных деформаций. С помощью численного моделированиясовместно с Лысьвенским заводом эмалированной посуды и Лысьвенским заводом бытовой техники спроектированы новые эффективные технологические операции вытяжки и раздачи стакана, штамповки ручки и штамповки панели с ребрами жесткости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-590310-р.

## ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ЛИСТОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ

**Е.Ю. Классман[1], В.В. Астанин [2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2] *Уфимский авиационный технический университет, Уфа*

klassman@mail.ru

В настоящей работе показана возможность применения низкотемпературной сверхпластичности для прокатки тонких листов из сплава ВТ22, а также анализ их свойств. Для обеспечения заданного режима деформации было выполнено численное моделирование процесса изотермической прокатки (ИТП) в виде двумерной задачи с помощью пакета ANSYS в режиме автоматической разметки конечных элементов по условию максимальной точности. Полученные таким способом тонкие листы с ультрамелкозернистой структурой из высокопрочного титанового сплава ВТ22 обладают уникальным комплексом свойств.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310221-5.

## БОЛЬШИЕ НЕОБРАТИМЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

**Л.В. Ковтанюк [1], А.О. Лемза[2]**

[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

[2]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

alsu-24@yandex.ru

В рамках теории больших деформаций упруговязкопластических материалов получены решения краевых задач о деформировании несжимаемого материала в зазоре между двумя соосными цилиндрическими поверхностями при заданной переменной скорости поворота одного из цилиндров. Рассмотрены условия прилипания в окрестности жёстких стенок и условия возможного проскальзывания материала вдоль внутреннего цилиндра. Необратимые деформации являются как деформациями ползучести, так и пластичности. Определены положение упругопластической границы, деформации, перемещения, напряжения в среде. Исследована релаксация напряжений после остановки цилиндра.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-01-00038.

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СЛОЖНОГО ДВУХОСНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ

**А.А. Крюков**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

andreevich-alex@mail.ru

Работа посвящена исследованию методики повышения усталостной долговечности стальных цилиндрических изделий. Она заключается в создании в приповерхностной области изделия сжимающих остаточных напряжений за счет последовательного упругопластического деформирования сначала растяжением, а затем, при фиксации полученной при растяжении продольной деформации, кручением со сменами направления закручивания. Деформирование совместным растяжением и реверсивным кручением позволяет обеспечить благоприятное (с позиции повышения усталостной долговечности) распределение остаточных осевых напряжений по поперечному сечению тела при минимальных значениях остаточных касательных напряжений.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО СЖАТИЯАМКМ B95/10% SIC В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

**Д.И. Крючков, А.В. Нестеренко, С.В. Смирнов**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

kru4koff@bk.ru

Приводятся результаты исследования деформационного поведенияв условиях одноосного сжатия (осадки) на цилиндрических образцах из алюмоматричного композитного материала B95/10% SiC в режиме высокотемпературной неустановившейся ползучести. Получены зависимости степени деформации сдвига и средней за процесс скорости деформации неустановившейся ползучести в диапазоне давлений в начальный момент нагружения от 5 МПа до 8 МПа при достижении температур 510 град. С, 530 град. С и 550 град.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-19-01358.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ СФЕРЫ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА, ПОЛЗУЧЕСТИ И ОБЛУЧЕНИЯ

**И.С. Куликов [1], П.И. Ширвель[2], А.В. Глембоцкий[2]**

[1]*Белорусская государственная академия авиации, Минск*

[2]*Белорусский национальный технический университет, Минск*

iskulikov@yandex.ru

Рассматривается напряженно-деформированное состояние трехслойной сферы в трехмерной постановке. При решении задачи учтены неупругие деформации термического расширения, радиационного распухания и ползучести. Предложен численный метод решения полученной в работе системы дифференциальных уравнений в частных производных для перемещений. Для проведения практических расчетов разработана математическая программа, которая может быть использована для расчетов шаровых тепловыделяющих элементов ядерного реактора.

## МОДЕЛЬ АНИЗОТРОПНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

**А.Ю. Ларичкин**

*Институт гидродинамики им.М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

larichking@gmail.com

Предложена модель анизотропной ползучести, которая учитывает различие свойств материала на растяжение и сжатие. Особенностью модели является учет различных показателей ползучести для направлений вдоль осей анизотропии. Учет свойств анизотропии при ползучести основан на модели Соснина. Учет различия свойств растяжения и сжатия производится за счет использования в модели угла вида напряженного состояния. Приведено сравнение результатов моделирования кручения круглых стержней с экспериментальными данными на примере сплава ВТ5-1 (Ti-Al-Sn-V) при температуре T=700°C. Показан различный характер скорости деформирования при кручении круглых сплошных стержней, вырезанных по нормали к исходной плите и поперек проката плиты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00358

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ РЕАКТОРНОЙ СТАЛИ 15Х2НМФА-А

**М.А. Леган[1], И.В. Любашевская [1], В.Д. Локтионов [2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

legan@ngs.ru

Получены экспериментальные кривые ползучести реакторной стали 15Х2НМФА-А в условиях одноосного растяжения при температурах 500, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050 и 1100 градусов Цельсия. Предложена зависимость скорости деформации ползучести от температуры, которая апробирована на экспериментальных данных для реакторной стали. Эту зависимость можно применять для моделирования работы реактора в аварийном режиме в исследованных диапазонах температур, превышающих эксплуатационную температуру. Для реакторной стали 15Х2НМФА-А получена оценка температуры, ниже которой установившейся ползучести нет.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ БОЙКИ- ПОЛОСА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

**О.С. Лехов, А.В. Михалев, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов**

*Российский государственный профессионально-педагогический университет, Россия, г. Екатеринбург*

mxlehov38@yandex.ru

Изложены результаты теоретического исследования напряжений в системе бойки-полоса при получении стальных листов на установке непрерывного литья и деформации. Приведены параметры опытной установки непрерывного литья и деформации для получения стальных полос. Изложена постановка задачи и результаты определения напряжений в очаге циклической деформации металла и в бойках от усилия обжатия и температурной нагрузки методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS. Представлены эпюры осевых напряжений при получении на установке листов сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С. Определены величины и закономерности распределения осевых напряжений в бойках от усилия обжатия и температурной нагрузки.

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СОСТОЯНИЯ СЖИМАЕМЫХ ЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ

**А.Ю. Лошманов[1], А.Н. Анисимов [1], А.А. Буханько [2], А.И. Хромов [3]**

[1]*Амурсий гуманитарно-педагогический государственный университет, Комсомольск-на-Амуре*

[2]*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара*

[3]*Комсмольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре*

pppkms2339@gmail.com

В работе рассматривается подход к описанию достижения предельного состояния упрочняющихся жёсткопластических тел на основании гипотезы об определении достижения такого состояния исчерпанием пластических свойств материала. Представлены поверхности деформационных состояний и описаны предельные состояния для пластически сжимаемых жёсткопластических сред; выведены соотношения, позволяющие построить линии, определяющие деформирование образцов при плоской деформации.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПО СОСТАВУ БЛИЗКОГО К МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ

**Ш.Х. Мухтаров[1], В.М. Имаев [1], Р.В. Шахов [1], А.А. Ганеев [1], А.В. Логунов [2], Р.М. Имаев [1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск*

shamilm@imsp.ru

В работе изучали влияние термической и деформационно-термической обработки на микроструктуру высоколегированного никелевого сплава, по составу близкого к некоторым монокристаллическим сплавам и предполагаемого в качестве дискового материала для перспективных газотурбинных двигателей. Была разработана опытная технология и режимы деформационно-термической обработки, обеспечивающие измельчение крупнокристаллической литой структуры за счет развития в сплаве непрерывной динамической рекристаллизации. Новый сплав продемонстрировал превосходную кратковременную прочность и длительную прочность при 650°С при сохранении приемлемой пластичности в сравнении с известными жаропрочными дисковыми сплавами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 18-19-00594).

## ВЛИЯНИЕ КРУЧЕНИЯ ПОД КВАЗИГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ И ОТЖИГА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВА INCONEL 718, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

**К.Ш. Мухтарова [1], Р.В. Шахов [2], В.М. Имаев [2]**

[1]*Ufa State Aviation Technical University, Ufa*

[2]*Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian academy of sciences, Ufa*

kamilla551@gmail.com

Сравнительно исследована микроструктура и измерена микротвердость сплава Inconel 718, изготовленного методом селективного лазерного плавления (СЛП) и по традиционной технологии в горячекованом состоянии. Обнаружено, что в отличие от горячекованого состояния СЛП-материал имеет более мелкий размер γ зерен и развитую субструктуру. Кручение под квазигидростатическим давлением привело к растворению дисперсных выделений, измельчению структуры и повышению микротвердости в обоих состояниях сплава. Отжиг деформированного сплава способствовал выделению частиц δ фазы и дополнительному увеличению микротвердости, при этом твердость СЛП-сплава оказалась выше твердости традиционного сплава.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН (АААА-А17-117041310215-4).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ВИДУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРИ НАГРУЖЕНИИ РАСТЯЖЕНИЕМ–КРУЧЕНИЕМ ДО РАЗРУШЕНИЯ

**Е.В. Нагорных[1], В.Г. Баженов,[1]Д.А. Казаков[1]**

[1]*Научно–исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

pavlyonkova@mech.unn.ru

Представлены результаты экспериментального и численного анализа процессов упругопластического деформирования сплошных цилиндрических образцов из сталей12Х18Н10Т, малоуглеродистойи конструкционной низколегированной при монотонных кинематических нагружениях растяжением–кручением до разрушения с учетом больших деформаций и неоднородности напряженно–деформированного состояния. На основе экспериментально–расчетного метода построены истинные диаграммы деформирования этих материалов при растяжении и кручении. Выявлена чувствительность пластических свойств малоуглеродистой и конструкционной низколегированной сталей к виду напряженного состояния при умеренных деформациях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант №17–08–00972–а).

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭНДОХРОННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

**С.П. Помыткин[1], Б.Е. Мельников[2]**

[1]*Университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург*

[2]*Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

sppom@yandex.ru

В рамках эндохронного подхода предлагаются варианты нелинейных определяющих соотношений теории ползучести тензорно-параметрического типа, учитывающие зависимость поведения материалов от вида напряжённого состояния, а также большие деформации и повороты. Приводятся примеры, демонстрирующие новые возможности подхода. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-01241А.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ В ОДНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

**А.В. Пономарев[1, 2], А.В. Бочков [2], Ю.М. Козырев [2], Т.Е. Молчанова [2], Gerard Raisson [3]**

[1]*Институт прикладной механики РАН, Москва*

[2]*МИРЭА - Российский технологический университет, Москва*

[3]*Consultant, Cournon D'Auvergne, France*

avpon@yandex.ru

В работе предложена новая методика определения механических характеристик порошкового материала, необходимых для математического моделирования процесса горячего изостатического прессования (ГИП). Предложенная методика позволяет определить необходимые характеристики в одном эксперименте, что важно ввиду их высокой стоимости. Актуальность задачи связана со сложностью прогнозирования конечной формы изделия, что вынуждает прибегать к математическому моделированию процесса ГИП.

## УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ С ЖЕСТКИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

**А.Н. Прокудин[1]**

[1]*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*

sunbeam_85@mail.ru

Получено аналитическое решение задачи об упругопластическом деформировании вращающегося цилиндра с жестким включением. В постановке задачи используется теория малых деформаций, ассоциированный закон пластического течения и условие пластичности Треска. Предполагается, что материал цилиндра является идеальным упругопластическим. Получены распределения перемещений, деформаций и напряжений на стадиях нагрузки и разгрузки, а также после остановки цилиндра.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХИЗДЕЛИЯХ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

**В.П. Радченко[1], М.Н. Саушкин[2], В.В. Цветков[3]**

*Самарский государственный технический университет, Самара*

[1]radchenko.vp@samgu.ru, [2]saushkin.mn@samgtu.ru, [3]vi.v.tsvetkoff@gmail.com

Разработан метод решения краевых задач ползучести поверхностно упрочненных полых и сплошных цилиндрических изделий с начальным напряженно-деформированным состоянием (после процедуры упрочнения) в условиях сложного квазистатического

нагружения (термоэкспозиция, кручение, осевое растяжение, внутренней давление и их комбинации). Выполнен детальный теоретический анализ поставленной задачи. Наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных для остаточных напряжений в различные временные сечения.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00550_а.

## ЭНДОХРОННАЯ ТЕОРИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОСТИ АНИЗОТРОПНОГО ТЕЛА

**Б.С. Сарбаев**
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*
bssarbayev@mail.ru

Предложен вариант определяющих соотношений эндохронной теории термопластичности для анизотропного тела. Рассматривается частный случай ортотропного тела при плоском напряженном состоянии. Получены уравнения для описания сложного нагружения, т.е. при непропорциональном изменении напряжений и температуры. Рассмотрен пример, в котором описано деформирование материала при одноосном растяжении при постоянной температуре после предварительного нагрева. Показана зависимость касательной жесткости от температуры предварительного нагрева.

## ПРЯМАЯ ЭКСТРУЗИЯ ПОРОПЛАСТОВ

**Г.М. Севастьянов[1], А.М. Севастьянов[2]**
[1]*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*
[2]*Амурскийгуманитарно-педагогический государственный университет, Комсомольск-на-Амуре*
akela.86@mail.ru

Рассматривается стационарное движение идеально-пластического сжимаемого материала в сходящемся коническом канале. Полагается выполнение условия текучести типа Грина и ассоциированного с ним закона пластического течения. На поверхностиконтакта материала со стенкой канала считается выполненным закон максимального трения. Тензор напряжений Коши как функция локальной плотности среды определяется решением обыкновенного нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, а установление пространственного распределения плотности сводится к отысканию определенного интеграла.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-00189 (мол_а).

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ

**А.С. Семенов[1]**
[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия*
semenov.artem@googlemail.com

На основе методов механики диссипативных сред получены термодинамически согласованные определяющие уравнения для описания нелинейного поведения поликристаллического сегнетоэлектроупругого материала, учитывающие наличие точечных дефектов и их влияние на процессы переключения в диапазоне температур не сопровождающемся фазовыми переходами. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными для кривых диэлектрического гистерезиса и поверхностей переключения при непропорциональном нагружении поликристаллических пьезоэлектрических материалов PZT-4D, PZT-5H и $BaTiO_3$ продемонстрировало хорошую точность прогнозов предложенных моделей.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-19-00413.

## КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫЕ ФУНКЦИИ ПЛАСТИЧНОСТИ И ВРАЩАЮЩИЙСЯ ДИСК

**Э. В. Сёмка, М. А. Артемов, Е. С. Барановский**
*Воронежский государственный университет, Воронеж*
semka_elya@mail.ru

Приводится решение задачи о быстровращающемся диске, находящемся в упругопластическом состоянии, для кусочно-линейного пластического потенциала общего вида. Дается альтернативное объяснение появлению разрыва поля перемещения, получаемого в рамках теории пластического течения для условия пластичности Треска, относительно трактовки, данной в работе У. Гамера 1983 г. Показано, что для всех кусочно-линейных функций пластичности, кроме Треска, перемещения во всех точках диска будут непрерывны.

## ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА БОЛЬШИХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

**Л.У. Султанов**
*Казанский федеральный университет, Казань*
Lenar.Sultanov@kpfu.ru

Работа посвящена разработке методики расчета больших упругопластических трехмерных тел в рамках метода последовательных нагружений на основе уравнения принципа возможных мощностей. Кинематика упругопластических деформаций основана на мультипликативном разложении полного градиента деформации. Разработан метод проецирования напряжений на поверхность текучести с итерационным уточнением текущего напряженно-деформированного состояния. Пространственная дискретизация основана на методе конечных элементов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №18-41-160021.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ В СПЛАВЕ ВТ-6 ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

**В.В. Терауд [1, 2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,*

ldrnww@gmail.com

Исследована ползучесть растягиваемых титановых образцов вплоть до разрушения при регистрации эволюции деформаций ползучести методом бесконтактных измерений. Испытания проводились при 450°C, 500°C и 600°C при различных значениях начальных напряжений. Время до разрушения составило до одного месяца. Для объективной оценки момента образования шейки использован математический параметр Ω, который принимает значение 0 при отсутствии шейки и значение 1 при ее наличии. Для проведенных экспериментов получены значения моментов локализации ползучести. Среднее время локализации деформаций для проведенных экспериментов составило 65% от времени до разрушения.

## ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕМБРАНЫ ВНУТРИ П-ОБРАЗНОЙ МАТРИЦЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ПОПЕРЕЧНОМ ДАВЛЕНИИ

**В.В. Терауд [1, 2], А.М. Локощенко [1], Е.А. Шеварова [1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,*

ldrnww@gmail.com, loko@imec.msu.ru, kat121193@ya.ru

Исследуется задача о ползучести длинной прямоугольной мембраны внутри П-образной матрицы под воздействием переменного поперечного давления. Рассматриваются два варианта условий контакта мембраны и матрицы: идеальное скольжение и прилипание. Исследованы четыре стадии, описывающие постепенное заполнение мембраной пространства внутри матрицы. Анализ проводится до практически полного прилегания мембраны к матрице. Получены характеристики мембраны в зависимости от типа контактных условий и характера изменения поперечного давления во времени.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-08-00210.

## О ПОСТРОЕНИИ УРАВНЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ, СВОЙСТВА КОТОРЫХ ЗАВИСЯТ ОТ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

**А.А. Трещев [1]**

[1]*Тульский государственный университет, Тула*

taa58@yandex.ru

Предлагается обобщенная форма связи скоростей деформации ползучести и напряжений для изотропных материалов, реологические свойства которых зависят от двух нетрадиционных факторов - гидростатического напряжения и вида напряженного состояния. Эти уравнения получены на основе предложенного потенциала ползучести, построенного с использованием параметров векторного пространства нормированных напряжений, связанного с девиаторной площадкой. С использованием методики ассоциированного закона течения получены уравнения позволяют определять скоростей ползучести от уровня напряжений. Определены ограничения на константы потенциала ползучести и их величины для ряда изотропных материалов.

## ПОВЕДЕНИЕ НОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГИПОУПРУГОСТИ С КОРОТАЦИОННЫМИ ОБЪЕКТИВНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

**З.Г. Тунгускова, Н.В. Овчинникова**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

tunguz44@mail.ru, ovch-n@yandex.ru

В работе получено точное аналитическое решение задачи об осевом сдвиге цилиндрического слоя, закрепленного по внутренней поверхности. На внешней поверхности задано или касательное напряжение в осевом направлении, или осевое перемещение. В качестве уравнения состояния принята модель гипоупругости с объективными производными коротационного типа: производной Яуманна и производной Грина – Мак-Инниса – Нахди. Проведено сравнение аналитического решения задачи с численным, полученным в программном комплексе ANSYS. Анализ решений показывает наличие эффекта Пойнтинга.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00669.

## ЭФФЕКТ ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ В СПЛАВЕ АМГ6: АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ И КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

**С.В. Уваров[1,2], Д.В. Ефремов[1]**

[1,2] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[3]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

usv@icmm.ru

Работа посвящена. исследованию критической динамики пространственно-временных флуктуаций напряжения пластического течения (эффект Портевена-Ле Шателье) магналя АМг6 в условиях осадки наклонных цилиндрических образцов, аналогичных [1], где было установлено наличие двух значений «критических» деформаций, соответствующих диапазону стохастической динамики,

характерной для поведения неравновесных критических систем – степенной расходимости времен следования флуктуаций в окрестности критических деформаций. Целью данной работы была проверка указанных эффектов и уточнение условий их возникновения.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-590149.

## РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ОБОБЩЕННОГО ВРЕМЕНИ В ХРОНОМЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Г.Д. Федоровский**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

g.fedorovsky@spbu.ru

Анализируется варианты эндохронного моделирования упруговязкопластических и прочностных свойств материалов. Построены определяющие уравнения взаимосвязи деформативных и прочностных характеристик исходного и наноструктурированного объемных материалов по данным диаграмм их растяжения, при использовании вертикального и горизонтального масштабирований, зависящих от параметров структуры и технологии изготовления. Рассмотрен пример применения подхода к металлам.
Работа выполнена при частичной поддержке гранта СПбГУ (Мероприятие 3, id 26130576).

## ПОЛЗУЧЕСТЬ СОСТАВНОГО РАСТЯГИВАЕМОГО СТЕРЖНЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

**Л.В. Фомин [1], Ю.В. Фомина[2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Средняя общеобразовательная школа №28, Городской округ Подольск*

fleonid1975@mail.ru

Исследовано напряженно-деформированное состояние составного растягиваемого стержня при ползучести в условиях воздействия на него агрессивной окружающей среды. Ползучесть каждой части стержня описана степенной моделью с разными параметрами. Влияние агрессивной среды определяется диффузионным проникновением ее элементов в материал стержня. Использован приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта. Проанализировано распределение напряжений во времени с учетом проникновения агрессивной среды в разные части стержня с разными коэффициентами диффузии. Получены условия, при которых напряжения в частях стержня либо сближаются во времени, либо расходятся.

## ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАЗНОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГОРНЫХ ПОРОД) И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РЕШЕНИЯХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

**А.И. Чанышев[1,2], И.М. Абдулин [1]**

[1] *Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск*

[2] *Новосибирский государственный университет экономики и управления, Новосибирск*

a.i.chanyshev@gmail.com

В предположении совпадения главных осей тензоров напряжений и деформаций строится собственный тензорный базис для разномодульных материалов (горных пород), отличающийся от собственного тензорного базиса для одномодульных сред (металлы) поворотом на некоторый фиксированный угол, зависящий от среды. Две паспортные зависимости – связи между координатами тензоров напряжений и деформаций в собственном тензорном базисе, имеют такой же характер как для металлов – прямая линия и «единая» кривая для состояний пластичности и запредельного деформирования. Эти факты подтверждаются анализом известных экспериментальных данных различных авторов, полученных при нагружении ряда горных пород.
Работа выполняется в рамках программы ГЗ № АААА-А17-117122090002-5.

## ВЕКТОР ДЕФОРМАЦИЙ КОШИ КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

**А.И. Чанышев**

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный университет экономики и управления, Новосибирск*

a.i.chanyshev@gmail.com

Такие понятия как «площадка», «вектор напряжений» играют важную роль при построении теорий пластичности и прочности. Однако есть еще вектор деформаций, характеризующий относительные смещения площадки. Для элемента среды он не зависит от точки отсчета смещений и обладает свойствами – его главные вектор и момент обращаются в ноль. Вычисление работы вектора напряжений Коши на изменениях вектора деформаций на площадке приводит к парадоксальному выводу – она даже в случае упругости не является потенциальной, например на площадках $\tau_{\max}$ (потенциальна на октаэдрических площадках!). Рассматриваются еще вопросы построения не полукругов, а кругов Мора для напряжений и деформаций.
Работа выполняется при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00757.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**Р.В. Шахов[1], Ш.Х. Мухтаров [1], А.Х. Ахунова [1], Ф.З. Утяшев [1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

shakhov-rv@yandex.ru

Моделированием процесса деформационно-термической обработки определены условия формирования однородной микроструктуры для труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов. Показана возможность прогнозирования процесса формирования микроструктуры на основе анализа напряженно-деформированного состояния и в зависимости от химического и фазового состава сплавов. Увеличение легирования никелевых сплавов, в том числе рением, приводит к образованию частично рекристаллизованной микроструктуры вместо гомогенной мелкозернистой для менее легированных сплавов при одних и тех же условиях деформации.
Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований РАН, №АААА-А17-117041310215-4.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЗОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА МУРНАГАНА

**О.Л. Швед**

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск*

swed@newman.bas-net.by

Для идеально упругопластического материала Мурнагана выполнено численное моделирование одноосных и двухосных нагружений растяжение и сжатие, проведенных до момента макроразрушения образцов. Описано явление возникновения и развития деформационной упругой и пластической анизотропии. Осуществлена проверка определяющих уравнений, задания параметров модели материала и предложенного критерия разрушения образца (в общем случае появления макротрещины). Установлена пригодность разработанных для триклинного материала комплексов программ на языке Фортран. Результаты расчетов кривых пластичности, отражающих возникшую анизотропию, сравниваются и с опытными данными Бриджмена.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОТРОПНОГО И КИНЕМАТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**А.В. Шутов[1,2], А.А. Кайгородцева[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. ЛаврентьеваСО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

alexey.v.shutov@gmail.com

В литературе представленомножество феноменологических моделей пластичности, описывающих анизотропное поведение материала на макроуровне в условиях многоосного нагружения. Зачастую, соответствующие параметры упрочнения определяются из решения некоторой обратной задачи. В работе исследуется вопрос идентификации параметров с оценкой устойчивости процедуры идентификации по отношению к погрешностям измерений. Вводится механически обоснованная метрика в пространстве параметров материала, обсуждаются её преимущества по отношению к евклидовой метрике. Рассматриваются примеры применения новой метрики к задачам идентификации. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01020.

## ЭФФЕКТЫ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ:ИССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

**А.Ю. Янц, П.В. Трусов, К.В.Остапович**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

maximus5.59@gmail.com

Представлена 2-хуровневая конститутивная упруговязкопластическая модель для описания поведения поликристаллических металлов и сплавов при сложном нагружении и больших деформациях. В модели явным образом учитываются плотности краевых дислокаций, а также их взаимодействие, приводящее к упрочнению. Для оценки влияния упрочнения и объяснения эффектов сложного нагружения проведен ряд численных экспериментов по нагружению по траекториям с изломом поликристаллов Al и Cu, отличающихся значениями энергии дефекта упаковки. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9), грантов РФФИ № 17-01-00379, 17-41-590694–р_а.

## ПОСТРОЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ В ЗАДАЧЕ О РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНКИ, ОСЛАБЛЕННОЙ ОТВЕРСТИЯМИ С УСЛОВИЕМ ТЕКУЧЕСТИ ОБЩЕГО ВИДА

**С. И. Сенашов[1], О. В. Гомонова[1], И.Л.Савостьянова[1]**

[1]*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф.Решетнева, Красноярск*

В работе, с помощью законов сохранения, решена задача о построении упругопластической границы для пластины с двумя круглыми отверстиями разного размера для условия пластичности общего вида. В качестве примера приведено решение, когда пластина находится в условиях плоского упругопластического напряженного состояния.

## Подсекция III-3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕДАХ

### ФОРМИРОВАНИЕ БИМОДАЛЬНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОВКОЙ И ЭКСТРУЗИЕЙ В СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА СИСТЕМЫ Ni-Mn-Ga

**Д.Р. Абдуллина[1], И.И. Мусабиров [2], И.М. Сафаров [2], Р.М. Галеев [2], Р.Ю. Гайфуллин [1], В.В. Коледов [3], Р.Р. Мулюков [2]**

[1]*Башкирский государственный университет, Уфа*

[2]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[3]*Институт радиотехники и электроники РАН, Москва*

din2512@yandex.ru

В работе представлены результаты анализа микроструктуры в сплаве Гейслера системы Ni-Mn-Ga подвергнутого комплексной деформации ковкой с последующей экструзией. В структуре сплава наблюдается бимодальная структура. В ней исходные крупные зерна окружены мелкозернистой структурой. В отличие от состояния после ковки, объемная доля мелкозернистой структуры больше.

### МОДЕЛЬ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ТЕРМОУПРУГОЙ СРЕДЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ТРЕЩИНЫ

**Л.А. Алексеева [1], Б. Н. Алипова[2]**

[1]*Институт математики и математического моделирования МОН РК, Алматы, Казахстан*

[2]*Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан*

b.alipova@iitu.kz

Разработана математическая модель динамики породного массива при возникновении трещин с использованием модели связанной термоупругости, которая, помимо упругих свойств, позволяет учитывать температуру массива и их взаимовлияние на процессы распространения ударных термоупругих волн. На основе метода обобщенных функций построено обобщенное решение задачи динамики термоупругой среды при возникновении трещины произвольной формы. При этом предполагается известной связь между скачком скоростей берегов трещины и скачком напряжений на ее берегах, что генерирует ударные волны в среде. Такая связь является моделью взаимодействия берегов трещины и должна определяться экспериментально, так как зависит от кристаллической структуры массива и его предела прочности. Здесь она предполагается функционально заданной. С использованием тензора Грина уравнений динамики термоупругой среды дано интегральное представление решения задачи при плоской деформации и в общем случае.

### ПРИБЛИЖЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧ ПРОНИКАНИЯ В МЯГКИЕ ГРУНТЫ

**М. Алхеддо [1], В.Л. Котов [1,2], Е.Ю. Линник [2], С.В. Саяпин [1], С.В. Сопин [1]**

[1]*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

[2]*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

vkotov@inbox.ru

Анализируются методики приближенного решения задач удара и проникания пространственных тел в мягкие грунтовые среды (инженерные методики) на основе сравнения с данными физического эксперимента и компьютерными расчетами в трехмерной постановке на основе нелинейной модели упругопластической грунтовой среды Григоряна. Верифицирована двухстадийная модель наклонного проникания в грунт пространственных тел по инерции.

Работа выполнена при финансировании федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.578.21.0246 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД НА РУДНИКАХ ВКМКС

**В.Н. Аптуков[1, 2], И.Б. Ваулина[1], С.В. Волегов[2]**

[1]*АО «ВНИИ Галургии», Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

aptukov@psu.ru

При эксплуатации соляных рудников важное значение имеет математическое моделирование механических процессов, происходящих в породном массиве под действием горного давления и техногенного влияния. Поведение соляных пород характеризуется вязкоупругопластическими деформациями, ростом поврежденности, хрупким разрушением в определенных условиях. Применяемые модели должны учитывать вышеуказанные факторы, а также быть простыми для практического применения. На основе развиваемого деформационного критерия разрушения представлены результаты численного моделирования процессов деформирования и разрушения образцов и элементов системы разработки рудников Верхнекамского месторождения калийных солей.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БРОНЕВЫХ СТАЛЕЙ

**С.А. Атрошенко, Ю.И. Мещеряков**

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

atroshenko@mail.ru

Работа посвящена исследованию динамических прочностных свойств броневой стали Ц-85 и для сравнения стали 30ХН4М. Для выявления механизмов деформирования и разрушения в условиях ударного нагружения проведен анализ микроструктуры сохраненных образцов. Показано, что с ростом скорости нагружения откольная прочность имеет максимум при скорости нагружения 500 м/с. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01053.

## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СИЛ СУХОГО И ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УДАРНОЕ СЖАТИЕ С УЧЕТОМ РАДИАЛЬНОЙ ИНЕРЦИИ

**В.Г. Баженов, Д.Л. Осетров**

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

bazhenov@mech.unn.ru

Экспериментально и численно исследовано влияние сил сухого и вязкого трения на динамическое деформирование упруговязкопластических образцов-таблеток. Разработан новый метод идентификации коэффициентов сухого трения на контактных поверхностях в зависимости от формоизменения образцов-таблеток. Теоретически с высокой степенью достоверности обосновано разделение задачи двухпараметрической идентификации на две задачи: определение коэффициента трения и построение истинной динамической диаграммы деформирования с учетом сил трения и радиальной инерции.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00972-а.

## ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОУПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПРИ НАЛИЧИИ ВОЛНОВОГО БАРЬЕРА

**А.А.Белов, А.Н. Петров, М.В. Григорьев**

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

andrey.petrov@mech.unn.ru

Рассмотрено численное моделирование поверхностных волн на пороупругом полупространстве при наличии волнового барьера в виде траншеи. Моделирование проведено методом граничных элементов на основе граничных интегральных уравнений трехмерной изотропной теории пороупргости в преобразованиях по Лапласу. Пороупругая среда описывается моделью Био. Решение во времени получено с помощью шагового метода численного обращения преобразования Лапласа. Построены динамические отклики перемещений от действия силы в виде функции Хевисайда по времени на поверхность полупространства.
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор №14.Y26.31.0031).

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРМОУСТОЙЧИВОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЛЕДЯЩИХ НАГРУЗОК

**Г.Н. Белосточный,О.А. Мыльцина**

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

belostochny@mail.ru

В рамках различных по степени точности теорий оболочек на основе континуальной модели геометрически нерегулярной упругой системы (ГНО) решаются задачи динамической термоупругости пластин и пологих, прямоугольных в плане, цилиндрической и постоянного кручения оболочек находящихся под действием внешних воздействий. Сингулярные дифференциальные уравнения (ДУ) динамической термоустойчивости ГНО содержат слагаемые учитывающие влияние тангенциальных усилий возникающих в упругой системе в ее исходном безмоментном состоянии в форме Брайена. Предварительно определяется поле перемещений в ГНО в ее исходном безмоментном состоянии. Нестационарное температурное поле в ГНО получено путем решения ДУ для температурных функций при линейной аппроксимации. Предполагается, что к краям ГНО приложены периодические по временной координате тангенциальные силовые нагрузки заданной интенсивности. Решения ДУ рассчитываются в виде суммы двойного тригонометрического ряда с переменными коэффициентами по временной координате для функции прогиба и многочленов по пространственным переменным для тангенциальных компонент поля перемещений. Методом Галеркина решение сведено к систем трех уравнений относительно коэффициентов аппроксимирующих рядов. Полученная система методом функции перемещений сведена к одному ДУ Матье. Стандартным образом (по Болотину) определяются первые три области динамической неустойчивости. Анализируется влияние геометрических параметров оболочек на конфигурацию областей неустойчивости ГНО.
Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 9.8570.2017/8.9.

## ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ НЕКОТОРЫХ БИОКОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

**А.В. Бойко**[1], **В.В. Зуев**[2]

[1]*НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*МИРЕА-Московский Технологический Университет, Москва*

mailband@mail.ru

Предложена модель динамических, в частности, ударных воздействий на некоторые классы биоконструкций (имплантат - костная ткань, голова - защитная конструкция), материалы которых могут необратимо деформироваться и разрушаться. Разработан и реализован вычислительный комплекс, позволяющий наглядно демонстрировать зоны деформаций и разрушений, выводить важнейшие характеристики исследуемых динамических процессов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРА И ПРОНИКАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В МЯГКИЕ ГРУНТОВЫЕ СРЕДЫ

**А.М. Брагов [1], В.В. Баландин [2], Вл.Вл. Баландин [2], В.Л. Котов [1,2], В.В. Пархачев [2]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

[2]*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

vkotov@inbox.ru

Представлен экспериментальный комплекс для регистрации параметров процесса проникания твердых тел в грунтовые среды на основе: методики мерного стержня в обращенном эксперименте; методики прямого эксперимента с фоторегистрацией процесса взаимодействия ударника с грунтовой мишенью; радиоинтерферометрической методики регистрации перемещения заднего торца ударника, взаимодействующего с преградой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246) (проведение экспериментов) и гранта РФФИ 19-08-00977 (выполнение расчетов).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ИСТИННОЙ КРИВОЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов**

*Научно-исследовательский институт механики при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

bragov@mech.unn.ru

При экспериментальном исследовании расчет напряжений и деформаций в образце проводится по зарегистрированным силам и смещениям с использованием предположения об однородности соответствующих полей. При растяжении образцов из вязкопластических материалов возникает локализация деформаций, приводящая к образованию шейки. В этом случае для интерпретации экспериментальной информации необходимо привлечение дополнительных инструментов. В работе описана схема, основанная на итерационной корректировке кривой деформирования в ходе численного моделирования процесса растяжения образца. Приводятся примеры применения указанной процедуры.

Динамический эксперимент проводился при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 9.6109.2017/6.7). Теоретические исследования выполнены при поддержке гранта президента РФ МД-1221.2019.8.

## СТРУКТУРА ХОЛОДНОКАТАНОГО НИКЕЛЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

**И.Ш. Валеев[1,2], А.Х. Валеева[1,2], Р.Р. Ильясов[1], О.Ш. Ситдиков[1], М.В. Маркушев[1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

valeevs@mail.ru

Исследовали влияние нагревов электрическим током высокой плотности на структуру никеля, деформированного прокаткой при комнатной температуре до степени 90%. Оценивали однократное и многократное воздействие импульсами тока. Обнаружено увеличение доли рекристаллизованных зерен и их размера с количеством циклов обработки, вызванного увеличением суммарного времени теплового воздействия. Обсуждена природа трансформации структуры никеля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00953А.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАЗГОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ В ГРУНТ

**В.А. Велданов**[1], **С.В. Федоров** [1], **М.Ю. Сотский**[1]

[1]*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*

vevladi@mail.ru

Рассмотрена возможность увеличения глубины проникания ударников, содержащих газодинамические разгонные устройства в виде реактивного двигателя или отстреливаемой с помощью порохового заряда балластной массы. Решается задача движения в грунтовой преграде твердого тела переменной массы под действием силы сопротивления и силы от газодинамического устройства. Расчетная модель базируется на эмпирическом двучленном законе сопротивления. Показано, что при рациональном выборе времени начала действия реактивной тяги и момента отстрела балластной массы глубина проникания ударника в грунтовую преграду может быть увеличена до двух и более раз.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОМПОЗИТНУЮ ПЛАСТИНУС УЧЕТОМ РАССЕИВАНИЯ ЭНЕРГИИ В МАТЕРИАЛЕ

**Р.К. Газизуллин**

*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Казань*

gazizullin.rk@yandex.ru

На основе использования дискретно структурной модели деформирования многослойных пластин при малых перемещениях, деформациях и учете внутреннего трения материалов слоев по модели Томпсона-Кельвина-Фойгта рассмотрена задача о прохождении плоской моногармонической звуковой волны сквозь тонкую композитную прямоугольную пластину, шарнирно закрепленную в проеме абсолютно жесткой перегородки, и построено ее точное аналитическое решение. На его основе в зависимости от частоты падающей на пластину звуковой волны проведено исследование звукоизоляционных свойств и параметров напряженно-деформированного состояния пластины, изготовленной из слоев углеродной ткани.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00058.

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗДУВА ЭЛАСТОМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ С ПОДКРЕПЛЕНИЯМИ

**Р.Ш. Гимадиев**

*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

gimadievr@mail.ru

Рассматривается динамика раздува цилиндрической оболочки, изготовленной из эластомера. Уравнения динамики безмоментных оболочек и колец усиления рассмавтриваются совместно. Численный алгоритм решения пространственной задачи реализуется на основе метода конечных разностей по явной схеме. В исследовании рассматривается граничный случай, когда торцы оболочки при деформации остаются в своих плоскостях и свободно могут изменяться по радиусу. Исследуется влияние колец усиления на уровень критического давления. Проводится анализ результатов численных экспериментов раздува оболочки при различных вариантах подкрепления кольцами усиления.

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ НА ЛАЗЕРНУЮ ГЕНЕРАЦИЮ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**А.Л. Глазов**[1], **Н.Ф.Морозов** [2,3], **К.Л. Муратиков** [1]

[1]*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

glazov.holo@mail.ioffe.ru

Проанализирован процесс лазерной генерации ультразвука в металлах с внутренними механическими напряжениями в рамках теории термоупругости. Продемонстрирована чувствительность фотоакустического метода в сочетании с методом сверления отверстий к механическим напряжениям. На примере алюминиевого сплава Д16 выявлено соответствие поведения сигнала в напряженной металлической пластине с решением задачи Кирша для распределения напряжений вокруг отверстия. Отмечена необходимость учета электронных процессов для корректного описания поведения фотоакустического сигнала от напряженных металлов. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-001892.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В КОМПОЗИТАХ С ОСЛАБЛЕННОЙ МЕЖСЛОЕВОЙ АДГЕЗИЕЙ

**М.В. Голуб, О.В. Дорошенко, А.А. Еремин**

*Кубанский государственный университет, ИММИ, Краснодар*

oldorosh@mail.ru

Исследуется распространение упругих волн в многослойных материалах с микродефектами на границах раздела границ слоев. Ослабленная интерфейсная адгезия моделируется граничными условиями пружинного типа, где компоненты матрицы жесткости определяются упругими свойствами слоев, характерными размерами микродефектов и частотой. Изучается влияние поврежденности интерфейса на дисперсионные свойства композитов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект № 9.1022.2017/4.6.

## ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНЫХ БРИЗЕРОВ НА МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК

**С.В. Дмитриев**[1], **А.С. Семенов** [2]

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Мирнинский политехнический институт (филиал)*

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, Мирный, Якутия*

dmitriev.sergey.v@gmail.com

Дискретный бризер (ДБ) – это пространственно локализованная колебательная мода большой амплитуды в нелинейных решетках с трансляционной симметрией. Возможность существования ДБ в различных кристаллах была показана методом молекулярной динамики, путем первопринципного моделирования и в ряде экспериментальных исследований. Однако влияние ДБ на легко измеряемые в эксперименте макроскопические свойства кристаллов до сих пор практически не изучалось. В докладе будут представлены результаты численного исследования влияния ДБ на теплоемкость и тепловое расширение нелинейных одномерных цепочек.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-02-00984 (СВД) и гранта РНФ № 18-72-00006 (АСС).

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, УСИЛИВАЮЩИХ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВИБРАЦИИ ЗАГЛУБЛЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

**Н.С. Дюкина**

*НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород*

ndyukina@inbox.ru

Разработаны эффективные вычислительная модель и программные средства для анализа сейсмических вибраций сооружений, учитывающие поле сил тяжести и контактное взаимодействие с грунтовым основанием. Из нескольких серий вычислительных экспериментов получены конкретные примеры изменения сейсмической реакции заглубленных сооружений с изменением параметров рассматриваемой задачи. Для различных вариантов сооружений, воздействий, грунтовых оснований проанализированы факторы, усиливающие сейсмические вибрации заглубленных крупногабаритных сооружений.

Исследования частично профинансированы РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00986-а.

## О СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕ В УПРУГОМ КЛИНЕ

**Г.Л. Заворохин**[1], **А.И. Назаров** [2], **С.А. Назаров** [2]

[1]*Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

zavorokhin@pdmi.ras.ru

Установлено существование симметричной моды в упругом клине для всех допустимых значений коэффициента Пуассона и для произвольных углов раскрытия, близких к $\pi$. Найден принципиально новый эффект − наличие волны, локализованной в окрестности ребра клина с углом больше развернутого.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-11-01003

## О МЕТОДЕ ПЕРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

**Д.А. Индейцев** [1,2], **Б.Н. Семёнов**[1,2], **Д.С. Вавилов**[1,3]

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

[3]*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург*

londr@yandex.ru

Данная работа посвящена развитию метода поиска приближённого решения нестационарной задачи на переменном интервале, впервые предложенного Л.И. Слепяном. Область применимости этого метода расширена до систем уравнений, включающих уравнения как гиперболического, так и параболического вида. На его основе построено решение динамической задачи термоупругости и произведена оценка отклика среды на тепловое возмущение вдали от источника, что не удаётся сделать с помощью классического подхода, использующего преобразование Лапласа.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-00182.

## ПРИМЕНЕНИЕ ШАГОВЫХ СХЕМ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН НА ПОРОВЯЗКОУПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

**А.А. Ипатов**

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

ipatov@mech.unn.ru

В работе исследуется распространение волн на поровязкоупругом полупространстве. Поровязкоупругая постановка опирается на полную модель насыщенной пороупругой среды Био с применением принципа соответствия. Решение исходной задачи строится в пространстве преобразований Лапласа, с последующим применением шаговых схем для обращения интегрального преобразования.

Для получения решения в изображениях записывается система граничных интегральных уравнений, далее применяется метод граничных элементов. Решается задача о действии силы в виде функции Хевисайда на поверхность поровязкоупругого полупространства.
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-08-00895 а).

## ТЕОРИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПОГРАНСЛОЯ В ОБОЛОЧКАХ ВРАЩЕНИЯ ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НОРМАЛЬНОГО ТИПА

**Л.Ю. Коссович[1], И.В. Кириллова[1]**
[1]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Саратов*
president@info.sgu.ru

Данная работа завершает исследования авторов в построении асимптотической теории нестационарных процессов в тонких оболочках вращения, основанной на представлении решения для напряжённо-деформированного состояния (НДС) в виде комбинации компонент с различными значениями показателей изменяемости и динамичности. Получены асимптотические уравнения, описывающие эллиптический погранслой в окрестности условного фронта поверхностной волны Рэлея при действии ударных поверхностных и торцевых нагрузок нормального типа. Используются асимптотические методы на базе решений с помощью символического метода Лурье. Поведение погранслоя по толщине оболочки описываются эллиптическими уравнениями, а граничные условия на лицевых поверхностях (в случае ударных воздействий на торец полубесконечной оболочки вращения – после сведения задачи к задаче об ударном воздействии на поверхность оболочки) – гиперболическими уравнениями, характеризующими волновой процесс на этих поверхностях.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СРЕДЕ ПРИ НАЛИЧИИ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ

**В.А. Лаврова[1], Д.А. Индейцев [1,2], В.А. Полянский[1,2]**
[1]*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург*
[2]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
victoria.lav95@gmail.com

В данной работе поведено исследование влияние водородной коррозии на время задержки сигнала, как одной из характеристик, используемых в акустических методах неразрушающего контроля. Взаимодействие водорода с металлом учтено с помощью биконтинуальной модели. Получена зависимость толщины слоя, подверженного водородной коррозии, от концентрации водорода. Определена зависимость временной задержки сигнала от концентрации водорода в материале. Также рассмотрено воздействия водорода на материал в случае его появления в процессе изготовления конструкции.
Работа выполнена при поддержке стипендиального фонда Siemens.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРУЕМОГО ВЗРЫВОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КОМПАКТНОГО ЭЛЕМЕНТА

**С.В. Ладов, В.И. Колпаков, Я.М. Никольская, С.В. Федоров**
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*
sm4-2009@mail.ru

Представлены результаты численного моделирования процесса взрывного формирования высокоскоростного компактного элемента из медных, стальных и алюминиевых кумулятивных облицовок, сочетающих в себе форму полусферического сегмента, плавно переходящего в цилиндрическую поверхность (облицовок типа «полусфера-цилиндр»). При этом установлено, что пластические свойства материала и критические условия его разрушения не влияют на конечную скорость формируемого высокоскоростного компактного элемента, однако оказывают влияние на его форму, размеры и массу. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5330.2017 БЧ).

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ОДИНОЧНОГО СПЕКЛА ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

**М.Д. Лимов, Н.С. Знаменьщикова, М.Н. Осипов**
*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара*
osipov7@yandex.ru

Представлены теоретические и экспериментальные результаты по исследованию динамических процессов методом спекл-интерферометрии одиночного спекла при наличии внешних помех. Предложена математическая модель выходного сигнала спекл-интерферометра на одиночном спекле при наличии внешних шумов. Представлены теоретические и экспериментальные результаты поведения выходного сигнала спекл-интерферометра при наличии внешних шумов. Показано, что наличие внешних шумов не сказывается на возможности определения параметров исследуемого динамического процесса – амплитуда, частота.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛОСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ВОЛНЫ В УПРУГОЙ СРЕДЕ С ПРЕГРАДОЙ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

**Н.А. Локтева [1,2], Нгуен Зыонг Фунг [2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Московский авиационный институт (национальный технический университет), Москва*

nlok@rambler.ru

Рассматривается нестационарная задача о взаимодействии пластины сложной конструкции с волной, возникающей в окружающей ее среде. Для получения связанного решения определяются компоненты напряженно-деформированного состояния в среде и перемещения среды и преграды в зонах контакта. Применяются разложения в тригонометрические ряды и преобразования Лапласа. Полученные результаты позволяют определять напряжения и перемещения в точках грунта, расположенных на различных расстояниях от вибропоглощающей преграды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00968 А.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОВЕДЕНИЯ СООРУЖЕНИЯ, ЗАГЛУБЛЕННОГО В АНИЗОТРОПНОЕ УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

**И.П. Марков, А.В. Боев**

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

alexboev11@mail.ru

Для моделирования динамики трехмерных линейно упругих составных тел с кусочно-непрерывным распределением механических свойств представлена численная методика в рамках прямого подхода метода граничных элементов. Подход базируется на регуляризованных граничных интегральных уравнениях в изображениях по Лапласу. Для дискретизации граничных интегральных уравнений используются смешанные граничные элементы совместно с методом коллокаций. Приведены результаты гранично-элементного моделирования нестационарного динамического деформирования сооружения, расположенного в анизотропном упругом полупространстве.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00082).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЛОИСТЫХ И БЛОЧНЫХ СРЕД С НЕЛИНЕЙНЫМИ КОНТАКТНЫМИ УСЛОВИЯМИ

**И.С. Никитин[1], Н.Г. Бураго [2], В. И. Голубев [3] , А.Д. Никитин [1]**

[1]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[3]*Московский Физико-Технический Институт (НИУ), Москва*

i_nikitin@list.ru

Построены континуальные модели деформируемых твердых сред с дискретным набором плоскостей скольжения (слоистые, блочные среды) и с нелинейными условиями проскальзывания вязкопластического типа на контактных границах. Определяющие уравнения модели содержат малый параметр вязкости в знаменателе нелинейных свободных членов. Для устойчивого численного решения системы уравнений предложен явно-неявный метод с явной аппроксимацией уравнений движения и неявной аппроксимацией определяющих соотношений, содержащих малый параметр. Приведены примеры решений задач о рассеянии волн на трещиноватых кластерах в упругой среде, о формировании зон скольжений и отслоений на границах структурных элементов.

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩЕГО ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕРЖНЯ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

**В.П. Павлов, Л.Р. Нуратуллина**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

victor.pavlov.51@yandex.ru

Рассматриваются поперечные колебания прямого стержня, имеющего переменное по длине поперечное сечение. Решается задача разработки методики построения разнообразных стержней с поперечными сечениями, изменяющимися вдоль оси стержня, для которых уравнение собственных колебаний имеет точное решение при выбранных собственной частоте и форме колебаний. В качестве примера рассмотрен стержень шарнирно закрепленный по концам с прямоугольным поперечным сечением. Для определения размеров данного сечения построены функции, параметрами которых являются форма колебаний, частота собственных колебаний, длина стержня, модуль Юнга и плотность материала.

## ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВОДОРОД

**В.А. Полянский, А.В. Порубов, К.П. Фролова, Ю.А. Яковлев**

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

vapol@mail.ru

В докладе рассматривается модель би-континуального материала, содержащего водород, под действием динамических нагрузок. Уравнения упрощены в одномерной постановке с учетом малости критических концентраций водорода. Рассматривается возмож-

ность существования водорода с двумя уровнями энергий связи: диффузно-подвижного и связанного. Для анализа решений в одномерной постановке применен волновой подход, получены солитоноподобные решения для переменной части концентрации связанного водорода. Полученный результат позволяет объяснить динамическое перераспределение водорода под действием внешней механической нагрузки, которое наблюдается экспериментально.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-08-00783, 18-08-00201, 18-31-00329.

## МЕТОД ПЕРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА В ЗАДАЧЕ О ДИНАМИКЕ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕПЛОВОГО ИСТОЧНИКА

**О.В.Привалова[1], Д.А. Индейцев[1,2], А.В. Лукин[1], И.А. Попов[1], Л.В. Штукин[1,2]**
[1]*Санкт-Петербургский Политехнический университет, Санкт-Петербург*
[2]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
lvtvsh4749@gmail.com

Рассмотрена задача о распространении волны прогиба, возникающей в упругом элементе МЭМС при действии движущегося вдоль него импульсного теплового источника, действие которого сводится к температурным продольной сжимающей силе и изгибающему моменту. Решение задачи о распространении волны прогиба производится методом переменного интервала. Для нахождении длины интервала выбран критерий - максимум потенциальной энергии упругой деформации изгиба. Показано, что при достаточно большой скорости движения теплового источника нарастание прогиба во времени замедляется
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00414.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НОСОВЫХ ОТСЕКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**В.И. Пусев, Г.В. Белов, В.А. Марков, Ю.В. Попов, В.В. Селиванов, В.В. Фролов**
*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва*
pusev-2012@mail.ru

Рассмотрены особенности конструкций летательных аппаратов военного и гражданского назначения в части внутреннего оборудования носовых отсеков. Исследованы тенденции изменения массы внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов по мере развития летательных аппаратов, а также особенности конструкции внутреннего оборудования.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00701-а.

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

**А.В. Радченко, П.А. Радченко, С.П. Батуев**
*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*
andrey-radchenko@live.ru

В работе представлены результаты численных и экспериментальных исследования разрушения металлических конструкций и конструкций из бетона и фибробетона. В бетонных конструкция учитывалось наличие армирующих элементов. В качестве материала армирующих элементов использовалась сталь и анизотропные композиты. Численное моделирование проводилось методом конечных элементов в полной трехмерной постановке с использованием авторского программного комплекса EFES. При построении конечно-элементных моделей и моделировании воспроизводилась реальная геометрия и структура конструкций, учитывалась анизотропия упругих и прочностных свойств, пластичность, фрагментация конструкций при разрушении.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-41-703003 и № 18-48-700035.

## ВРЕМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Н.С. Селютина[1,2]**
[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
nina.selutina@gmail.com

Временные зависимости прочности бетонов и горных пород прогнозируются на основе критерия инкубационного времени. Дается интерпретация эффекту большей прочности водонасыщенных бетонов и горных пород на высоких скоростях деформации. Повышение динамической прочности бетона при добавлении фиброволокна в широком диапазоне скоростей деформации прогнозируется с помощью инкубационного времени, связанного с присутствием дефектов в образце.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01053.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

**И.В. Сергеичев[1], Б.С. Волосков [1], С.Д. Конев [1], А.А. Сафонов [1], И.Ш. Ахатов [1], С.В. Дубинский [2], В.В. Коновалов [2], А.В. Панков [2], А.А. Карабутов [3,4], Е.А. Миронова [3,4]**

[1]*Сколковский институт науки и технологий, Центр Проектирования, производственных технологии и материалов, Москва*

[2]*ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

[3]*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

[4]*Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

i.sergeichev@skoltech.ru

Представлены методика и результаты экспериментального анализа процесса формоизменения низкоскоростных ударных повреждений на примере типовых углепластиковых панелей с различными схемами армирования. Разработанная методика основана на применении системы цифровой корреляции изображений для контроля формы и размеров области повреждений в режиме реального времени. Для анализа повреждений по толщине панелей применялся метод лазерной оптоакутической структуроскопии. Полученные экспериментальные зависимости позволили установить характерные временные интервалы формоизменения повреждений в диапазоне температур -50…+50°C.

## КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАВ-ФИЛЬТРОВ НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТИТАНАТА БАРИЯ СТРОНЦИЯ

**П.Е. Тимошенко[1], А.В. Панькин[1, 2], В.Б. Широков[2], В.В. Калинчук[2]**

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

[2]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

P.E.Timoshenko@gmail.com

Рассматривается задача возбуждения и распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в акустических фильтрах на тонких пьезоэлектрических пленках титаната бария стронция, расположенных на подложке из оксида магния. Встречно-штыревые преобразователи (ВШП), используемые в работе, представляют систему из параллельно расположенных алюминиевых электродов (штырей), попеременно соединенных друг с другом через общие шины. Конечно-элементное моделирование процессов возбуждения и распространения ПАВ выполнено в коммерческом пакете COMSOL. В работе обсуждаются: особенности моделирования, влияние деформации несоответствия сегнетоэлектрической пленки при комнатной температуре на две первые низкочастотные поверхностные акустические моды, влияние толщины пленки на значения резонансных и антирезонансных частот ВШП и коэффициент электромеханической связи (КЭМС).

Работа выполнена в рамках выполнения госзадания ЮНЦ РАН (проект 01201354242) при финансовой поддержке РФФИ, гранты 19-01-00719, 19-08-01051 и 18-08-01012.

## ИЗМЕНЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**В.Г. Трифонов, Г.Р. Халикова, Г.Ф. Корзникова**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

vadimt@anrb.ru

Исследовано влияние интенсивной пластической деформации (ИПД) кручением под высоким давлением на изменение растворимости легирующих элементов в алюминиевых сплавах АК21 и АК12ММгН-18%SiC. Образцы диаметром 8 мм были вырезаны из жидкоштампованных заготовок и утонены до толщины ~1 мм. Деформацию кручением при комнатной температуре на 5 оборотов и давлении 6 ГПа осуществляли на наковальне Бриджмана. После деформации образцы отжигали в интервале температур 300…500°C в течение 5 минут. При ИПД имело место активное растворение частиц кремния и интерметаллидных фаз. Последующий отжиг сплавов привел к распаду деформационно-пересыщенного легирующими элементами алюминиевого твердого раствора и выделению нетипичных для исследуемых сплавов части вторичных фаз. Растворение частиц SiC не наблюдалось.

## ЗАДЕРЖКА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

**А.А. Уткин[1,2]**

[1] *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

a.utkin51@gmail.com

Рассматривается задача разрушения материала с трещиной при воздействии динамической нагрузкой. Обсуждаются некоторые эффекты разрушения, наблюдаемые в ряде экспериментов. Установлено, что фиксируемая при проведении экспериментов задержка разрушения получает объяснение в рамках структурно-временного подхода. Найдены условия ее возникновения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01053.

## ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВАЖНОСТИ И РОЛИ ЦИФРЫ СЕМЬ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

**В.И. Шабуневич**

*Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт (ВНИКТИ), Коломна*

Viktor-shab@yandex.ru

В данной работе с помощью гармонического анализа конечно-элементных (КЭ) моделей основных твердых тел (шара и куба) показана физическая сущность и значение того, что для этих тел число резонансных пиков при увеличении частоты нагружения, например, перегрузкой и температурой во всем диапазоне отклика моделей всегда равно 7 (или 12, как число нот в одной октаве). Расчеты проводились с использованием программного комплекса MSC Patran/Nastran.

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БАЛКИ ИЗ ВЯЗКОУПРУГОГО АУКСЕТИКА ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**М.В. Шитикова, О. Аженеза**

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

mvs@vgasu.vrn.ru

Рассматривается задача об ударе жесткого шара по линейной пластинке Кирхгоффа-Лява конечных размеров, выполненной из вязкоупругого ауксетика, демпфирующие свойства которого описываются моделью с производными дробного порядка. Коэффициент Пуассона ауксетика изменяется с течением времени от отрицательного значения до положительного. Для линейной пластинки решение вне контактной области строится при помощи функции Грина, а решение в области контакта конструируется с использованием обобщенной теории Герца. Для местного смятия материала пластинки и для контактной силы получены интегральные уравнения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-11-00200.

## ПРОЦЕССЫ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ С КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

**М.Н. Кривошеина[1,2], Е.В. Туч[1], С.В. Кобенко[3]**

*[1]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск.*

*[2]Томский государственный университет, Россия, Томск.*

*[3]Нижневартовский государственный университет, Россия, Нижневартовск.*

marina_nkr@mail.ru

Монокристаллы металлов и их сплавов обладают повышенными прочностными свойствами и применяются в авиа- и двигателестроении. Методом конечных элементов проведено исследование процессов упругопластического деформирования в монокристалле с кубической симметрией механических свойств, характеризующимся ауксетичностью (отрицательными значениями коэффициентов Пуассона). Рассмотрены процессы ударного нагружения вдоль осей, совпадающих с направлениями осей симметрии монокристалла [001], [011], а также [111]. В этих направлениях традиционно проводятся исследования механических свойств в натурных экспериментах вследствие возможности разделения в этих направлениях продольных и поперечных волн. Показано, что в случае совпадения направления ударного нагружения с направлением [011], вплоть до момента снятия нагрузки, в одном перпендикулярном направлении наблюдается упругая деформация того же знака, т.е. сжимающая деформация. Это объясняется влиянием отрицательного коэффициента Пуассона. Показано, что упругие свойства вдоль направлений [011] в кристаллах с кубической симметрией свойств в значительной мере определяют упругопластические деформации.

## СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ ОБЫКНОВЕННЫХ ХОНДРИТОВ ПОСЛЕ НАГРУЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ-СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

**Р.Ф. Муфтахетдинова, В.И. Гроховский, Е.В. Петрова, Г.А. Яковлев**

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

gizrozka91@bk.ru

Методами оптической и электронной микроскопии исследованы структурные изменения вещества метеоритов Царев L5 и Челябинск LL5 после проведенных экспериментов по ударному нагружению сферически-сходящимися волнами. Проведен сравнительный анализ структуры Fe-Ni сплавов и железосодержащих минералов в исходных и ударно-деформированных образцах. Ударное давление и температура увеличивается от внешней части к центру нагруженных шаров. Также приведены оценки скоростей охлаждения в кристаллизационном интервале переплавленной области ударенных образцов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00598.

## Подсекция III-4. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И ПОВРЕЖДЕНИЙ

### КРИТЕРИЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫЙ НА КОНЦЕПЦИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

**А.Р. Арутюнян, Р.А. Арутюнян**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

a.arutyunyan@spbu.ru

Композиционные материалы при циклических нагружениях деформируются и разрушаются вследствие накопления дефектов различной природы, что подтверждают многочисленные экспериментальные исследования. На основе этих результатов и с учетом концепции рассеянного повреждения и разрушения в работе сформулирован критерий усталости для этих материалов. Относительное изменение модуля упругости в процессе циклических нагружений рассматривается в качестве параметра сплошности (поврежденности). Дано сравнение полученных теоретических кривых накопления повреждений и кривых усталости с экспериментальными результатами по усталости углепластиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-01-00146).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В ПРОЦЕССЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

**М.В. Банников, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

mbannikov@icmm.ru

Приведена методика оценки накопления необратимых усталостных повреждений с помощью анализа нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки. В режиме гигацикловой усталости проявляются аномалии упругих свойств материала, вызываемые накоплением повреждений которые уменьшают упругий модуль материала, что приводит к эффекту нелинейности в амплитуде колебаний. Методика применена к образцам из титана, железа, сплавов алюминия при различных уровнях напряжений для обнаружения усталостных трещин при циклическом нагружении.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-72-00142.

### ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Ю.В. Баяндин, М.В. Банников, Д.Д. Бутманов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

buv@icmm.ru

Целью работы является исследование упругих и прочностных свойств термопластичных материалов для 3D-печати: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), модифицированный гликолем полиэтилентерефталат (PETG), термопластичный эластомер (TPE), полилактид (PLA), сополимер бутадиена и стирола (SBS). Проведены стандартные испытания на растяжение образцов, изготовленных с укладкой слоев параллельно и перпендикулярно оси растяжения. Исследования механических и прочностных свойств позволяют оценить несущую способность изделий из термопластичных материалов. Результаты стандартных испытаний могут быть использованы для моделирования поведения таких изделий при квазистатических, циклических и динамических нагрузках. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-48-590562.

### МЕТОД МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ

**О.Н. Белова**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

buv@icmm.ru

Целью работы является исследование упругих и прочностных свойств термопластичных материалов для 3D-печати: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), модифицированный гликолем полиэтилентерефталат (PETG), термопластичный эластомер (TPE), полилактид (PLA), сополимер бутадиена и стирола (SBS). Проведены стандартные испытания на растяжение образцов, изготовленных с укладкой слоев параллельно и перпендикулярно оси растяжения. Исследования механических и прочностных свойств позволяют оценить несущую способность изделий из термопластичных материалов. Результаты стандартных испытаний могут быть использованы для моделирования поведения таких изделий при квазистатических, циклических и динамических нагрузках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-48-590562.

### ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА СМЫКАНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

**Д.А. Билалов [1], М.В. Банников [1], С.Р. Баяндин[2], О.Б. Наймарк [1]**

*[1]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

*[2]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

krd2874@mail.ru

Предложена модификация уравнения Пэриса при помощи которой можно описать эффект смыкания трещины. Прописана зависимость константы Пэриса от параметра совершённой работы. Выделены два энергетических барьера, отвечающие за схлопывание и возобновление роста трещины. Определены дополнительные константы построенной модели. Полученные результаты численных

расчётов находятся в хорошем соответствии с данными эксперимента. Это говорит о том, что предложенная модель способна адекватно описывать эффект схлопывания трещины.
Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-72-00142.

## РАЗРУШЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ МНОГО- И ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

**Д.А. Билалов, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк**
*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
ledon@icmm.ru

Построена математическая модель для описания поведения металлов и сплавов при различных типах нагружения. Параметры модели идентифицированы на примере сплава АМг2.5. Численно получена кривая Вёлера (S-N диаграмма) в диапазоне $10^2$-$10^{10}$ циклов нагружения. Описан эффект дуальности кривой усталостного разрушения. Рассмотрен процесс предварительного динамического деформирования и последующих усталостных испытаний. Показано, что исследуемый материал слабо чувствителен к предварительному динамическому нагружению, что подтверждается экспериментами. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-01186 а, 17-41-590149 р_а, 17-08-00905 а.

## РАЗРУШЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ИЗ БЕТОНА МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

**В.А. Блинов [1], М.А. Леган [1, 2]**
[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*
blin89-08@mail.ru

Построена математическая модель для описания поведения металлов и сплавов при различных типах нагружения. Параметры модели идентифицированы на примере сплава АМг2.5. Численно получена кривая Вёлера (S-N диаграмма) в диапазоне $10^2$-$10^{10}$ циклов нагружения. Описан эффект дуальности кривой усталостного разрушения. Рассмотрен процесс предварительного динамического деформирования и последующих усталостных испытаний. Показано, что исследуемый материал слабо чувствителен к предварительному динамическому нагружению, что подтверждается экспериментами. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-01186 а, 17-41-590149 р_а, 17-08-00905 а.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЁСТКОСТИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

**А.С.Букатый, С.А.Букатый, Е.В.Зотов, В.В. Лунин**
*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Самара*
bukaty@inbox.ru

С целью диагностики наиболее опасных зон разработан безразмерный комплексный критерий, который предлагается использовать для анализа напряжённого состояния ответственных авиационных деталей. Критерий включает коэффициент жёсткости напряжённого состояния и энергетический критерий, характеризующий напряжённость материала в упругопластической области. Оптимизация геометрических размеров и формы деталей осуществляется в соответствии с условием минимизации разработанного критерия. Разработана методика применения критериев для оптимизации конструкции ответственных деталей ГТД, подвергающихся действию статических или циклически изменяющихся нагрузок в многоцикловой и малоцикловой области.

## РАЗРУШЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ИЗ БЕТОНА МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

**А.А. Быков, Н.В. Буртелова, В.С. Молчанов**
*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный*
Aleks-Bykov@yandex.ru
burtelova031@gmail.com

В работе представлено исследование зависимости количества дефектов в образцах из стальной проволоки от приложенной нагрузки. В результате томографического исследования образцов, разгруженных после достижения различных значений растягивающих напряжений, была определена зависимость количества дефектов от приложенной нагрузки, которая описывается следующим образом: в процессе упругого нагружения и затем пластического деформирования количество дефектов растет, однако в момент начала пластических деформаций оно резко падает до почти начального значения.

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА И ФОРМЫ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.Х. Валеева [1], И.Ш. Валеев [2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

valeevs@imail.ru

На основе математического моделирования и натурных экспериментов исследованы микроструктура и механические свойства композиционных покрытий на основе никеля, представляющих металломатричные композиты с наполнителями. В качестве наполнителя рассмотрены ультрадисперсная оксидокерамика и технический углерод, получаемые при очистке дымовых газов, являющихся многотоннажным отходом нефтехимических производств. Эффективность указанных наполнителей оценивалась в сравнении с нанокластерными алмазами.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАКОПЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ С ЦЕЛЬЮ ДИАГНОСТИКИ ТЕКУЩЕЙ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА

**А.И. Ведерникова, А.Ю. Изюмова, О.А. Плехов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

terekhina.a@icmm.ru

Диссипация энергии в металлах в процессе их пластического деформирования приводит к тепловыделению в областях локализации деформации. В работе приведены результаты расчета мощности источников тепла на основе решения осредненного уравнения теплопроводности с использованием данных измерения температуры методом ИК-сканирования. С использованием методики прямой регистрации потока тепла на поверхности образца с помощью контактного датчика на основе элемента Пельтье проведена верификация данных мощности источников тепла, получаемых на основе ИК-сканирования. Показана взаимосвязь между моментом разрушения металлических образцов из сплава ВТ1-0 и изменением характера генерации тепла, вызванного необратимым деформированием материала. Установлено, что при достижении некоторого критического значения накопленной энергии происходит зарождение макротрещины, при этом скорость накопления энергии стремится к нулю. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-00293 мол_а.

## РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТУК ПРИ АВАРИЙНЫХ ПАДЕНИЯХ

**О.Ю. Виленский, С.А. Душев, Д.А. Лапшин, А.М. Татарский**

*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород*

silaev@okbm.nnov.ru

Проведен анализ динамического воздействия высокой интенсивности в конструкции ТУК. Определена актуальность решения данной задачи, цели и пути решения. Кратко освещены теоретические основы конструкционного демпфирования - поглощения энергии удара путем неупругого сопротивления (значительного пластического деформирования) материала деформируемых элементов конструкций. Сформулированы необходимые условия использования расчетных методов для оценки работоспособности ТУК. Кратко освещены возможности современных вычислительных комплексов (ANSYS, LS-DYNA) в которых реализовано полномасштабное математическое 3D-моделирование позволяющее выполнять достаточно глубокий и детальный анализ динамических процессов. Описаны расчетно-экспериментальные методы исследования моделей деформирования конструкционных материалов при статическом и динамическом нагружениях и определение на основе экспериментальных исследований параметров моделей (модели Jonson-Cook, модель Allen, Rule & Jones, модель Cowper-Symonds) из библиотеки LS-DYNA. Показано, что установка демпфирующего устройства является эффективным средством снижения динамических нагрузок на ТУК, позволяет локализовать зону динамического воздействия. При наличии комплекса необходимых условий, использование расчетных методов обоснования работоспособности демпфирующих устройств на стадии проектирования позволяет избежать дорогостоящих натурных испытаний, что способствует повышению конкурентоспособности изделий за счёт снижения их себестоимости. Сделан вывод, что расчетное обоснование работоспособности разрабатываемых конструкций возможно при наличии достоверных данных о характеристиках деформирования, которые могут быть получены в результате экспериментального исследования конструкционных материалов.

## УСТАЛОСТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНЫХ И ДВУХОСНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**В.Э. Вильдеман[1], А.С. Янкин[2], А.И. Мугатаров[3], Т.В. Чернова[4]**

*Центр экспериментальной механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[1]wildemann@pstu.ru, [2]yas.cem@yandex.ru, [3]cem_mugatarov@mail.ru, [4]thechernovs2009@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований усталостной долговечности конструкционной легированной стали 40ХГМА и сплава алюминия Д16Т при двухосном циклическом нагружении. Экспериментальные данные приведены в виде точек на графиках и соответствующих аппроксимирующих линий, отражающих зависимости числа циклов до разрушения от относительных величин постоянных составляющих касательных и нормальных напряжений. Во всех испытаниях задаваемые величины дополнительных составляющих компонент напряжений не превышали значений соответствующих условных пределов текучести.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 19-01-00555 А и в рамках государственного задания Минобрнауки России 9.7529.2017/9.10.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНЫХ И КОМПЛЕКСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**В.Э. Вильдеман**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

wildemann@pstu.ru

Рассматриваются вопросы исследования свойств конструкционных материалов с использованием современных испытательных систем, средств измерений и диагностики, получения новых данных о закономерностях процессов деформирования и разрушения при сложных нестационарных, комбинированных и комплексных термомеханических воздействиях. Рассмотрены некоторые актуальные направления и результаты экспериментальных исследований свойств материалов (металлов и композитов), связанные с эффектами накопления повреждений в условиях закритического деформирования, много- и малоцикловой усталости при сложном напряженном состоянии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-41-590360, 19-01-00555, 19-41-590016)

## МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

**П.С. Волегов, Н.В. Котельникова, К.А. Курмоярцева**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

crocinc@mail.ru

Рассматривается задача построения физически обоснованной модели для описания неупругого деформирования поликристаллических тел в условиях интенсивных неупругих деформаций с учетом механизмов формирования и эволюции микроповреждений. Предложена структура математической модели, рассмотрен механизм формирования микротрещин путем объединения дислокаций в головной части скопления, поджатого на препятствии, предложены геометрические параметры формирующейся микротрещины. Приведены основные соотношения, описывающие процесс деформирования на мезоуровне с учетом плотности дислокаций и микротрещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01292.

## КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОВРЕЖДЁННОЙ СРЕДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ДЛЯ РАСЧЁТА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

**И.А. Волков, Л.А. Игумнов, Д.Н. Шишулин**

*Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

pmptmvgavt@yandex.ru

С позиций механики повреждённой среды развита математическая модель, описывающая процесс деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при усталости и ползучести. Методом численного моделирования исследуются процессы вязкопластического деформирования и накопления повреждений в поликристаллических конструкционных сплавах. Представлены результаты численного моделирования усталостной долговечности и длительной прочности конструкций в ряде прикладных задач. Отмечены новые качественные и количественные особенности процесса разрушения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00881.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Б.С. Волосков, И.В. Сергеичев, С.Г. Абаимов, И.Ш. Ахатов**

*Сколковский институт науки и технологий,*

*Центр проектирования, производственных методов и материалов, Москва*

boris.voloskov@skoltech.ru

Представлены результаты статических и усталостных испытаний образцовкоррозионностойкой стали 316 L, изготовленных с использованием аддитивных технологий селективного лазерного плавления (selective laser melting, SLM) и прямого осаждения металла (direct metal tooling, DMT) Усталостные испытания были выполнены в диапазоне $10^4$- $10^9$ циклов нагружения. Проведен фрактографический анализ поверхностей разрушения образцов, на основании которого установлены механизмы зарождения и развития усталостных трещин.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

**Р. И. Воробьев[1], И. В. Сергеичев[1], А.А. Карабутов [2,3], Е.А. Миронова [2,3], И. Ш. Ахатов [1]**

[1]*Сколковский Институт Науки и Технологий, Центр Проектирования, производственных технологий и материалов, Москва*

[2]*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

[3]*Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

ruslan.vorobyev@skoltech.ru

Представлены результаты экспериментального анализа влияние пористости на трещиностойкость конструкционных углепластиков. Образцы собъемным содержанием пористости 0.25-5% изготовлены методом вакуумной инфузии. Для вариации пористости при изготовлении образцов обеспечивалась глубина вакуума до -760 мм. рт. ст.Объемное содержание пористости характеризовалось методами сканирующей электронной микроскопии, лазерной оптоакустической структуроскопии и химическим травлением. Получены экспериментальные зависимостихарактеристик межслоевой трещиностойкости от объемного содержания пористости при статическом и циклическом нагружении.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ В АЛЮМИНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

**Д.С. Воронин[1], А.Е. Майер[2], В.С. Красников[3]**

*Челябинский государственный университет, Челябинск*

[1]v-demonizerus@mail.ru, [2]mayer@csu.ru, [3]va_ja@mail.ru

На основе метода молекулярной динамики проводилось исследование кинетики образования пор в твердом алюминии, который подвергался всестороннему однородному растяжению при помощи программы LAMMPS и потенциала AL99. Распределение пор по размерам и их количество вычислялось при помощи алгоритма поиска пор. Для анализа распределения радиуса пор от количества пор применялся метод, предложенный в работах.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ВЕРШИНЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ОТ ЕЁ СКОРОСТИ ПРИ ДВУХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ

**А.Н. Вшивков [1],А.Ю. Изюмова [1], А.И. Ведерникова [1], А.П. Захаров [2], В.Н. Шлянников [2], О.А. Плехов [1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Казанский Научный Центр Российской академии наук, Казань*

vshivkov.a@icmm.ru

В работе проводилось исследование диссипации тепла в вершине усталостной трещины при двухосном нагружении крестообразных образцов из титанового сплава ВТ1 и нержавеющей стали 08Х18Н10. Для измерения диссипации тепла использовался метод инфракрасной термографии и датчик теплового потока. Испытания проводились с постоянной амплитудой приложенной нагрузки и различным параметром двухосности. По характеру диссипации тепла распространение трещины в режиме Париса можно разделить на два этапа: на первом скорость роста пропорциональна длине трещины и тепловому потоку, на второй – тепловому потоку.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-31-00293 мол_а и РФФИ № 16-51-48003.

## МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА С МАСШТАБНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ПАРАМЕТРОМ

**В.В. Глаголев, Л.В. Глаголев, А.А. Маркин, А.А. Фурсаев**

*Тульский государственный университет, Тула*

vadim@tsu.tula.ru

Рассматривается модель трещины с линейным параметром (ЛП), который ассоциируется с толщиной физического разреза и слоя взаимодействия (СВ). Исходному состоянию тела, приписываем начальную свободную энергию связи, которую принимаем отрицательной. Установлено универсальное представление поверхностной энергии справедливое как для физического, так и математического разрезов. В случае физического разреза поверхностная энергия выражается в виде произведения изменения удельной свободной энергии связи СВ на ЛП, называемого энергетическим произведением.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ проект № 18-31-20053 и № 19-41-710001 р_а.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙРЕСУРСА ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Н.Я.Головина**

*Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень*

ntgolovina@rambler.ru

Проведен сравнительный анализтрех моделей ресурса пластичных материалов: модель накопления остаточных деформаций, модель накопления работы диссипации и модель расходования запаса энергии разрушения.Установлено, что наиболее консервативная из рассмотренных моделей ресурса – модель накопления остаточных деформаций. Также установлено, что предел усталости полностью определяется пределом упругости и равен ему.

## КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – РЕШЕНИЕ НА ОСНОВЕ МКЭ

**В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов**

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

vas-gor@rambler.ru

Представлены математические модели и конечно-элементная методика численного решения в рамках соотношений механики поврежденной среды квазистатических задач исследования процессов накопления повреждений в материалах и разрушения элементов конструкций. Установлены закономерности возникновения и развития трещин в цилиндрическом образце с концентратором при осевом растяжении в условиях высокотемпературной ползучести в предположении вязкого характера разрушения образца. Выполнено численное моделирование процесса коррозионного разрушения трубчатого образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (Договор №14.Y26.31.0031).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ КЕРНА ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ С БОЛЬШИХ ГЛУБИН

**А.И. Грищенко, А.С. Семенов, Б.Е. Мельников**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

gai-gr@yandex.ru

Трещиностойкость нефтегазоматеринских пород является одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность добычи углеводородов из нетрадиционных месторождений. Основным источником данных о физико-механических свойствах горных пород являются извлекаемые керны, их использование позволяет существенно повысить точность трехмерных компьютерных геологических моделей, применяемых при проведении геологоразведочных работ, определении коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности месторождения, разработки залежей нефти и газа. В работе путем прямого конечно-элементного моделирования процессов разрушения кернов с трещинами различной начальной конфигурации вычислены коэффициенты интенсивности напряжений для определения критических размеров внутренних дефектов, а так же их пространственной ориентации, приводящих к разрушению керна при подъеме.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-01241.

## РАЗРУШЕНИЕ АДГЕЗИВА ПОКРЫТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

**Р.И. Губайдуллин [1], С.Н. Якупов[1,2]**

[1]*Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

[2]*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань*

ruslan_221294@mail.ru

На базе покрытий решают множество технических, экологических и экономических проблем. Разрабатываются функциональные и smart покрытия, которые формируются как на плоских поверхностях, так и непосредственно на криволинейных поверхностях элементов конструкций. Разработан экспериментально - теоретический метод определения адгезии тонкослойного покрытия сложной структуры, сформированного на цилиндрической поверхности. Метод является надежным инструментом как для оценки свойств адгезива, так и для исследования влияния физических полей и сред на изменение этих свойств. Рассмотрен пример исследования.

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

**Г.Н. Гусев [1], В.В. Епин [1], Р.В. Цветков [1], И.Н. Шардаков [1], А.П. Шестаков[1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

shap@icmm.ru

Проведено исследование процесса зарождения микродефектов в структуре бетона и последующее их объединение в макроскопические дефекты в виде трещин. Процесс разрушения реализован на 4-ех этажном монолитном здании в масштабе 1:2. Регистрация дефектов выполнялась двумя способами. Первый основан на ударном возбуждений упругих волн и последующей регистрации их распространения с помощью акселерометров. Второй основан на регистрации сигналов акустической эмиссии, возникающих при образовании дефектов в материале. Эволюция параметров вибрационного контроля и параметров акустической эмиссии позволили зафиксировать процесс образования трещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-29-00172.

## АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ОТКЛИКА МОДЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

**Г.Н. Гусев[1], В.В. Епин[1], И.Н. Шардаков[1], А.П. Шестаков[1], Р.В. Цветков[1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

shap@icmm.ru

Разработана и смонтирована на модельной железобетонной конструкции система тензодатчиков, нагружающих устройств и лазерных измерителей расстояний. Осуществлен эксперимент по исследованию особенностей распределения пространственного деформационного отклика элементов модельной конструкции в зависимости от места приложения локализованной самоуравновешенной

распирающей нагрузки. Анализ полученных данных позволил верифицировать разработанную математическую модель, описывающую квазистатическое деформирование элементов модельной железобетонной конструкции, установить границы зоны неупругого деформирования и начала образования трещин.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-29-00172.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ НИКЕЛЬ СОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ 3-Д ПЕЧАТИ

**С.А. Евлашин, Ю.О. Кузьминова, Д.В. Фирсов, А.В. Дьяков, С.С. Чугунов, И.Ш. Ахатов**
*Центр проектирования, производственных технологий и материалов*
*Сколковский институт науки и технологий, Москва*
S.Evlashin@skoltech.ru

В последние десятилетия появились новые перспективные сплавы, которые обладают улучшенными механическими характеристиками. Среди них средне- и высоко-энтропийные сплавы. Они состоят из 4 и более элементов с содержанием элементов в пределах от 5 до 35 %. За счет комбинации характеристик различных элементов удается добиться улучшенных механических характеристик. В данной работе исследуются среднеэнтропийный сплав CrFeCoNi, порученный методом 3D печати. В результате исследований были подобраны режимы спекания, исследованы структурные и механические характеристики в широком диапазоне температур. Данные напечатанного сплава существенно превосходят аналоги, полученные методом горячей прокатки.

## АКУСТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА (ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ)

**В.П. Епифанов[1], Н.А. Казаков[2]**
[1]*Институт проблем механики РАН, Москва*
[2]*СКБ САМИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск*
[1]evp@ipmnet.ru,[2]ncn_2001@mail.ru

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой научной концепции количественной связи между микро и макрохарактеристиками снега, включая разработку теоретической модели, метода исследования эволюции снега непосредственно в условиях залегания, количественную оценку его структуры в виде числового параметра, разработку портативной аппаратуры, реализующей метод. Предложена теоретическая модель. Получено удовлетворительное согласие теории с экспериментом. Подтверждена пригодность метода и аппаратуры. Полученные данные могут быть использованы для уточнения прогноза снежных лавин, времени проведения активного воздействия, а также для оценки проходимости снежного покрова транспортными средствами.

## МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА

**В.П. Епифанов**
*Институт проблем механики РАН, Москва*
evp@ipmnet.ru

Исследуется связь между макро свойствами льда и его микроскопическим строением. Непосредственно в процессе механических испытаний количественно исследованы акустическими методами деформационные изменения структуры льда в широком интервале термодинамического состояния. Качественно и количественно описано влияние деформационных дефектов на реологические и прочностные свойства льда. Впервые получены результаты многопланового исследования упругости льда при линейных и нелинейных деформациях. Предложены модели для количественного определения деформационных изменений структуры при нелинейных деформациях, включая формирование промежуточного слоя. Исследованы новые и малоизученные эффекты.

## МЕТОД КВАЗИЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ О ВСЕСТОРОННЕМ РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНЫ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

**Р.М. Жаббаров**
*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара*
were-wolff@yandex.ru

Целью настоящей работы является применение метода квазилинеаризации для построения приближенного аналитического решения задачи о всестороннем растяжении пластины в условиях ползучести и вычисления концентрации напряжения. В работе построено четыре квазилинейных приближения для решения краевой задачи о всестороннем растяжении пластины с центральным круговым отверстием в условиях ползучести. Из результатов видно, что при возрастании нелинейности материала, максимум тангенциального напряжения смещается вправо и достигается не на контуре кругового выреза, а во внутренней точке пластины, что в целом нехарактерно для задач о концентрации напряжений.

## ТЕРМО-ГИДРО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

**М.С. Желнин[1], А.А. Костина [1], И.А. Пантелеев [1], О.А. Плехов [1], Л.Ю.Левин [2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Горный институт УрО РАН, Пермь*

zhelnin.m@icmm.ru

В данной работе на основе разработанной термо-гидро-механической модели проводится исследование процесса формирования ЛПО во влагонасыщенном породном массиве. За основу математической модели принята система дифференциальных уравнений, описывающей нестационарную, неизотермическую фильтрацию с учетом фазового перехода первого рода, и изменения напряженно-деформируемого состояния породного скелета. В результате работы исследованы распределения температуры, напряжений и деформаций в породном массиве при искусственном замораживании. Выполнен анализ влияния на процесс фазового перехода кинетики кристаллизации и криогенных течений. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01204.

## О КРИТЕРИИ УСТАЛОСТНОГО МАСШТАБНО-СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

**Э.Б. Завойчинская**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

*elen@altomira.ru*

Представляется иерархическая модель хрупкого разрушения при пропорциональном нагружении. Формулируется система гипотез о стадийном развитии дефектов на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях. Строятся определяющие соотношения для вероятности разрушения и система уравнений многоуровневой повреждаемости. В качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, материальные функции определяются по данным усталостных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин и в соответствии с экспериментально обоснованными критериями усталостной прочности металлов. Строятся кривые усталости для различных предельных состояний металлов.

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ТРЕЩИН В УПРУГОМ ТЕЛЕ

**А.В. Звягин, А.А. Лужин, А.А. Шамина**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

zvyagin_aleksandr2012@yandex.ru

В работе рассматривается проблема взаимного влияния трёхмерных трещин в упругом теле, которое находится под внешней нагрузкой. Авторами разработан численный пакет решения задач механики трёхмерных трещин, основанный на методе граничных элементов (метод разрывных смещений). Приводится сравнение полученных численных результатов с имеющимися аналитическими решениями и работами других авторов. Анализ показал хорошее качественное и количественное совпадение основных характеристик. Рассмотрены круглые и эллиптические (в плане) трещины разной пространственной ориентации, их взаимное влияние и взаимодействие с жёсткими и свободными границами. Анализировалось раскрытие трещин, поля напряжений и коэффициенты интенсивности (КИН) в окрестности кромки трещин. Результаты исследований показали, что использование разработанной методики, даёт надёжный инструмент для расчёта прочности тела, ослабленного системой трещин.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-07-01111.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТАХ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Е.М. Зубова, В.Э. Вильдеман**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

cem.zubova@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению процессов накопления повреждений в углеродных композиционных материалах на начальной стадии нагружения с использованием системы для регистрации сигналов акустической эмиссии. Для описания эволюции развития дефектов в композитах использованы основные параметры сигналов акустической эмиссии такие. Получены новые опытные данные, построены графики зависимостей основных параметров сигналов акустической эмиссии от времени, иллюстрирующие механическое поведение композитов на ранней стадии нагружения. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00452 мол_а.

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ И КРУЧЕНИИ

**А.В. Ильиных, А.В. Лыкова, А.М. Паньков**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

ilinih@yandex.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей механического поведения и накопления повреждений конструкционных сталей и сплавов в условиях малоцикловой усталости при одноосном и двухосном циклическом деформировании на растяжение-сжатие и кручение. Приведены данные о влиянии различных параметров цикла и траекторий нагружения на

циклическую долговечность конструкционных сталей и сплавов. На основе использования линейных и нелинейных моделей накопления повреждений оценивается долговечность материалов при одноосном и двухосном малоцикловом нагружении. Представлены данные о вкладе теплового рассеяния в общую величину работы циклического деформирования.

## ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПЛАСТИН ИЗ ПММА ПРИ ПРОБИВАНИИ

**Н.А. Казаринов, В.А. Братов, Ю.В. Петров, А.М. Брагов, В.В. Баландин**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

n.kazarinov@spbu.ru

В работе исследовались процессы динамического разрушения пластин из ПММА при пробивании стальными ударниками. Были проведены как экспериментальные исследования, так и численное моделирование процессов разрушения. Экспериментальные исследования проводились при помощи газовой пушки и высокоскоростной камеры, измерялась скорость ударника до и после контакта с пластиной, что позволило определить пороговую скорость пробивания пластины. Исследовались пластины разной толщины. Проведенные эксперименты были промоделированы при помощи метода конечных элементов, а также критерия разрушения на основе концепции инкубационного времени. Было получено хорошее совпадения экспериментальных данных и численных результатов.

## ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ КИНЕТИКИ РОСТА ТРЕЩИНЫ В СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

**И.С. Каманцев, А.В. Кузнецов, Н.А. Друкаренко**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

ks@imach.uran.ru

Рассмотрены результаты изучения кинетики роста усталостных трещин в слоистом металлическом композиционном материале с использованием программно-аппаратного комплекса на основе лазерной динамической спекл-интерферометрии. Установлено, что основным механизмом снижающим скорость распространения усталостной трещины в слоистом материале является изменение напряженно-деформированного состояния в локализованной зоне пластических деформаций до выхода вершины трещины в новый слой. Экспериментальные результаты важны для полномасштабного моделирования развития трещины в градиентном материале. Возможность осуществления точных расчётов даст возможность достоверной оценки поведения составляющих конструкции любой сложности, изготовленной из материалов со сложной градиентной структурой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00339мол_а.

## ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К ИЗНОСУ ХВОСТОВИКА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАШИВКИ РОВИНГА

**Т.Д. Каримбаев, Д.В. Афанасьев, Д.В. Матюхин**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

matyukhin@rtc.ciam.ru

В работе продемонстрирован способ изготовления преформы лопатки вентилятора из полимерного композиционного материала с помощью технологии автоматической нашивки ровинга с использованием арамидной нити, позволяющий повысить износостойкость хвостовика. Предложена методика косвенной экспериментальной оценки повреждаемости хвостовика с помощью измерения теплового состояния поверхности и проведены сравнительные испытания лопаток, изготовленных по различным технологиям.

## ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ДЕТАЛИ И УЗЛЫ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Т.Д. Каримбаев**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), Москва*

tdkarimbaev@ciam.ru

При использовании композиционных материалов со свойствами, отличающимися от свойств традиционно используемых материалов, не обходится без применения новых подходов и разработок на всех этапах создания из них изделий. Представлены математические модели деформирования двухкомпонентных сред, нелинейные деформации хрупкой монолитной керамики, использованной в качестве матрицы керамического композиционного материала. Описаны приложения математических моделей к созданию деталей и узлов авиационных двигателей.

## ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА TI-6AL-4V, ПОЛУЧЕННОГО ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

**Р.М. Кашаев, М.И. Нагимов, А.М. Хуснуллин**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

rishat@kashaev.ru

Исследована трещиностойкость соединений титанового сплава *Ti-6Al-4V*, выполненных линейной сваркой трением. Результаты испытаний на трехточечный изгиб показали, что статическая трещиностойкость сварных соединений уступает статической трещи-

ностойкости основного металла и зависит от расположения предварительно нанесенной усталостной трещины: в зоне сварного шва или в переходной зоне. Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

**Р.А. Каюмов , А.М. Сулейманов, И.З. Мухамедова**

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань*

kayumov@ rambler.ru

Предложены физические соотношения для компонент пленочно-тканевого композитного материала (ПТКМ), связывающие статические, кинематические и структурные параметры материала при наличии ультрафиолетового облучения, перепада температуры и силовых воздействий. Рассматриваемый полимерный композит на тканевой основе представлен как неоднородное тело. При выборе структуры определяющих соотношений учтены известные экспериментальные факты относительно фаз ПТКМ. Рассмотрена задача оценки долговечности материала на основе обобщения феноменологического критерия прочности, учитывающего старение, ползучесть, накопление микроповреждений в фазах ПТКМ и перепад температуры. Для проведения качественного анализа поведения исследуемого композитного материала задача сформулирована при некоторых модельных определяющих соотношениях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 9.5762.2017/ВУ (проект № 9.1395.2017/ПЧ), и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00349).

## К ВОПРОСУ О ЕДИНОМ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

**Г.В. Клевцов [1], Н.А. Клевцова [1], Р.З. Валиев [2], И.Н. Пигалева [1]**

[1]*Тольяттинский государственный университет, Тольятти,*

[2]*НИИ Физики перспективных материалов УГАТУ, Уфа*

[1]*Klevtsov11948@mail.ru,* [2]*rzvaliev@outlook.com*

В настоящей работе исследовали широкий класс материалов с ОЦК, ГЦК и ГПУ решеткой, в том числе, УМЗ материалы, полученные путем ИПД. Показана возможность использования критерия $h_{max}/t$ ($h_{max}$ – максимальная глубинапластической зоны под поверхностью изломов; t – толщина образца или детали) для оценки локального напряженного состояния материала у вершины трещины при однократных и циклических видах нагружения. Показана связь $h_{max}/t$ с критерием $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$ для однократных видов нагружения и с критерием $t/(K_{max}/\sigma_{0,2})^2$ для циклических видов нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-08-00340_а).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА КАК ИНДИКАТОРА РАННИХ СТАДИЙ РАЗРУШЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

**В.А. Клюшников[1], В.В. Мишакин [1], Д.Н. Шишулин [2], М.Л. Качанов [3]**

[1]*Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН, Нижний Новгород*

[2]*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», НижнийНовгород*

[3]*Department of Mechanical Engineering, Tufts University, Medford MA 02155 USA*

slavchuk2@yandex.ru

Приведены результаты исследования влияния величины амплитуды усталостного нагружения аустенитных сталей на коэффициент Пуассона, определяемый акустическим методом. Показано, что изменение коэффициента Пуассона связано в основном с двумя факторами: накопление поврежденности и образованием фазы мартенсита. Показана возможность использования полученных данных при диагностике состояния метастабильных сталей при усталостном разрушении на ранних стадиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-00268.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОПОВЕДЕНИЯ ТЕЛ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ

**А.М. Кокуров[1, 2], И.Н. Одинцев [2]**

[1] *Публичное акционерное общество «Туполев», Москва*

[2] *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

and-kokurov@yandex.ru

Предложена модифицированная методика конечно-элементного моделирования виброповедения объектов, изготовленных из слоистых полимерных композитных материалов при наличии в них начальных аномалий структуры типа непроклеев. Ее особенностью является возможность учета степени реальной (ненулевой) адгезии между слоями в зоне дефекта. Представлены результаты расчетов тестовой задачи. Разрабатываемые подходы предполагается использовать для уточнения и обобщения данных дефектоскопии (вибродиагностики) реальных композитных конструкций.

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ КОНКРЕТИЗАЦИИ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ МОРА

**Н.М. Комарцов[1], М.А. Кулагина [1], Б.А. Рычков [1]**

[1] *Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек*

komartsovnm@mail.ru

Теория прочности Мора постулирует, что сопротивляемость сдвигу (касательное напряжение) является некоторой функцией от нормального напряжения на заданной плоскости. Семейство кругов таких предельных напряжений имеет огибающую, характеризующую условие прочности. В настоящем сообщении рассмотрен способ построения огибающей, исходя из некоторой аналитической зависимости между минимальным и максимальным главными напряжениями. Материальные параметры, входящие в эту зависимость, определены в соответствии с предлагаемой классификацией типов горных пород на основе сведений о структуре и изменении угла среза при различных условиях трехосного сжатия.

## МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ СДВИГА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

**Г.Ф. Корзникова, В.Н. Даниленко, А.П. Жиляев, Р.Х. Хисамов, К.С. Назаров, С.Н. Сергеев, Р.Р. Кабиров, Г.Р. Халикова, Р.Р. Мулюков**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

korznikova@anrb.ru

Представлены результаты исследования структуры и механических свойств металло-матричного композита Al-Cu-Al, полученного из исходных крупнозернистых пластин Al и Cu сдвигом под давлением на наковальнях Бриджмена с углублениями. Анализ структуры показал, что перемешивание произошло по всему объему за исключением центральной зоны. Предел прочности композита на растяжение составил 485 МПа, что существенно выше предела прочности, как чистого Al так и Cu. Оценка кинетики структурно-фазовых изменений при отжиге, показала, что основным механизмом роста интерметаллидных фаз является объемная диффузия.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-12-00440.

## УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ОХРУПЧИВАНИИ МАТЕРИАЛА. ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВОЙ ПОДХОД

**В.М. Корнев**

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

kornev@hydro.nsc.ru

Используется сдвоенный критерий разрушения для упруго пластического материала, имеющего предельное относительное удлинение, когда реализуется маломасштабная текучесть. Предложены два пороговых значения критических параметров для описания процесса скачкообразного продвижения вершин усталостных трещин. Охрупчивание материала зоны предразрушения описывается уравнением Коффина-Мэнсона. Получены аналитические выражения, связывающие скачкообразное продвижение вершины усталостной трещины с числом циклов. Для осредненного трехстадийного процесса указаны грубые оценки границ перехода от одной стадии к другой. На плоскости нагрузка – длина трещины выделены три подобласти. Эти подобласти соответствуют безопасному, относительно безопасному и опасному (недопустимому) режимам эксплуатации поврежденной конструкции.

## МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПЛАСТИНЫ С БОКОВЫМИ РАЗРЕЗАМИ

**Л.Н. Косыгина**

*Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С.П. Королева, Самара*

fleur.lilia@gmail.com

**Аннотация.** В работе проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) бесконечной пластины с двумя полубесконечными симметричными краевыми разрезами. Аналитическое решение получено с помощью разложения в ряд М. Уильямса и последующим подсчетом амплитудных коэффициентов разложения с использованием комплексного представления напряжений. Проведен анализ многопараметрического разложения поля напряжений и вычислительный эксперимент с удержанием различного количества слагаемых. Сравнение комплексного представления поля напряжений с полученным асимптотическим разложением в ряд М. Уильямса показало необходимость аккуратной оценки количества удерживаемых слагаемых в зависимости от расстояния от вершины трещины.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-01-00631.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДУЛЯ СВЯЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА И СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО НАПОЛНЕННОГО ПОЛИМЕРА

**Н.М. Кочнева, А.В. Гуляев**

*Научно-исследовательский институт полимерных материалов, Пермь*

GulyaevAV@inbox.ru

В работе проведены численные исследования взаимосвязи эффективных механических характеристик дисперсно наполненного полимерного материала при одноосном напряженном состоянии с напряженно-деформированным состоянием связующего компонента. Рассмотрено полидисперсное наполнение полимера частицами с размером от 0,16 до 0,315 мм и степенью объемного напол-

нения от 30 до 40 %. Численные исследования проводились с помощью метода конечных элементов в рамках программного комплекса Ansys.

## ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СДВИГЕ

**Н.А. Кудряшов, Р.В. Муратов, П.Н. Рябов**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва*

pnryabov31@gmail.com

Рассматривается процесс формирования полос локализованной деформации в термовязкопластичных металлах, подвергаемых высокоскоростным сдвиговым нагрузкам. Сформулирована математическая модель процесса, учитывающая деформационное упрочнение, термическое разупрочнение, а также диполярные эффекты. Разработан новый численный алгоритм и на его основе создан программный комплекс, позволяющий проводить математическое моделирование рассматриваемого процесса. На примере стали и бескислородной меди исследованы статистические особенности процесса самоорганизации полос локализованной деформации. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00209, гранта Президента МК-6044-2018-1.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСЧЕТУ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗОН РАЗРУШЕНИЙ ЦЕМЕНТНОЙ ОБОЛОЧКИ

**В.Д. Кургузов**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

kurguzov@hydro.nsc.ru

Представлена компьютерная двумерная модель деформирования цементной оболочки в обсаженной цементированной скважине внутри породного массива под действием внутреннего давления в обсадной колонне и внешнего давления горных пород. Модель использует несколько научно обоснованных и экспериментально подтвержденных критериев прочности с целью определения на их основе режима разрушения и потенциальных зон повреждения цементной оболочки. Проведен критический анализ выбранных критериев прочности. Даны рекомендации по использованию отобранных критериев при расчете реальных конструкций.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00528.

## ПРЕДПОРОГОВОЕ РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ

**С.Г. Лебединский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачев, А.Н. Поляков**

*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва*

*SLebedinski@Yandex.ru*

Предложен и экспериментально апробирован метод оценки закономерности развития усталостных трещин в предпороговой области при эксплуатационном процессе нагружения. Метод основан на снижении уровня случайного процесса нагружения, при сохранении его подобия по мере роста трещины. Управляющим фактором снижения нагрузки является естественное увеличение податливости образца с ростом трещины при фиксированном процессе раскрытия её берегов. Показано, что предложенный метод снижения уровня эксплуатационного нагружения позволяет, определять градиент снижения коэффициента интенсивности напряжений. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01513А.

## СТРУКТУРНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ СЖАТИИ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ

**П.В. Логинов, З.Р. Салихова, К.С. Султанов**

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз*

lopavi88@mail.ru

Рассматриваются известные экспериментальные диаграммы сжатия грунтов при статических и динамических нагружениях. На их основе определены изменения модуля деформации грунта на стадии нагружения. Показана зависимость изменения модуля деформации от скорости деформирования. С увеличением скорости деформирования интенсивность разрушения первоначальной структуры грунта увеличивается. Это приводит к уменьшению модуля деформации в начале процесса динамического сжатия. После достижения деформацией значения, достаточного к некоторому уплотнению грунта, значение модуля деформации растет. Предлагается учитывать эти результаты в уравнениях состояния грунтов.

## АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

**А.В. Лопатюк[1], А.М. Грачева[2]**

*[1]Башкирский государственный университет, Уфа*

*[2]Уфимский государственный авиационный технический университет*

alyona-lopatyuk@yandex.ru

На основе анализа рефлектограмм, полученных для оптических волокон реальной трассы, проведен анализ их дефектности на наличие трещин. Получен и проанализирован ряд рефлектограмм. Обсуждены причины возникновения трещин. Сделан вывод об остаточном ресурсе волокон.

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

**Р.Я. Лутфуллин, А.А. Круглов, А.А. Саркеева**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

lutfullin.ramil@imsp.ru

Представлены результаты оценки механического поведения при ударном нагружении слоистого материала, полученного сваркой давлением листов из титанового сплава. Наибольшее сопротивление ударному разрушению слоистый материал оказывает, когда трещина распространяется одновременно через все слои. С увеличением протяженности пор в зоне твердофазного соединения ударная вязкость при распространении трещины последовательно через каждый слой повышается, а при распространении трещины одновременно через все слои – понижается. Даны рекомендации по использованию слоистого материала в полых конструкциях.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ

**О.Н. Малинникова, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва*

iv_ev@mail.ru

Задачи мониторинга состояния массива горных пород в близи шахтных выработок в процессе буро - взрывных работ требуют совершенствования и корректировки существующих методов оценки изменяющегося напряженно - деформированного состояния (НДС) пород для предотвращения нежелательных катастрофических деформаций в горном массиве. В данной работе для условий плоской деформации предложен вычислительный подход на основе численного метода сглаженных частиц для определения НДС массива горной породы и его разрушения при техногенных воздействиях. На примере численного моделирования развития трещинообразования в горном массиве с выработкой при проведении взрывной отбойки уступа, проиллюстрирована возможность метода достаточно реалистично моделировать процессы развития деформаций и разрушения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00936.

## СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ МОНИТОРИНГЕ

**Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

ygmatvienko@gmail.com

Разработана структурно-феноменологическая концепция повреждений конструкционных материалов, в том числе полимерного композитного материала, реализуемаяв ходе акустико-эмиссионной диагностики изделия в режиме реального времени. Концепция основана на применении новых критериальных параметров, отражающих весовое содержание и частоту регистрации локационных импульсов в энергетических кластерах, характеризующих процессы разрушения структуры материала на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях. Концепция успешно апробирована в условиях стендовых испытаний конструктивно-подобного образца авиационной панели, включающего слоистую и ячеистую структуру с сотовым полимерным наполнителем, на статическое растяжение. Обсуждены также проблемы использования волоконно-оптических сенсоров в акустико-эмиссионном мониторинге композитных материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00351.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ РАЗНОНАПРАВЛЕННОСТИ УПРГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

**Н.А. Махутов, И.В. Макаренко, Л.В. Макаренко**

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; I.V.Makarenko@yandex.ru*

В результате расчетно-экспериментального и численного анализа предложен алгоритм методологии моделирования и схематизации постулируемых дефектов на основе современных концепций нелинейной механики разрушения. В работе представленырасчетно-экспериментальные результаты исследования упругопластических процессов циклического разрушения при исходных разноориентированных дефектах типа поверхностных полуэллиптических трещин в конструкционных анизотропных материалах. На основе полученных результатов и численных решений даны характеристики линейной и нелинейной механики разрушения с учетом физико-механической неоднородности таких аустенитных нержавеющих сталей как 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00572-а «Комплексное расчетно-экспериментальное исследование и моделирование нелинейных процессов деформирования и разрушения в зонах трещин при различных режимах нагружения с достижением предельных состояний».

## ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ПОВРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**Н.А. Махутов**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

kei51@mail.ru

Анализируются процессы и закономерности упругого и неупругого деформирования, ведущие к накоплению повреждений и развитию разрушения при экстремальных условиях механического, ударного, теплового, электромагнитного и аэрогидродинамического воздействий. При этом рассматриваются широкие диапазоны параметров нагружения и соответствующих им деформаций и напряжений. Диаграмма деформирования аппроксимируется степенными функциями, параметры которых варьируются для рассматриваемых условий нагружения. Показана приемлемость и перспективность деформационных критериев на разных стадиях повреждения и разрушения. Эти подходы используются для анализа штатных, аварийных и катастрофических ситуаций на современных высокорисковых объектах новой техники.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00572.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГАЗОПРОВОДОВ С ДЕФЕКТАМИ

**Г.Х. Мурзаханов**

*АО МОСГАЗ, Москва*

MurzakhanovGK@mos-gaz.ru

В докладе численными методами моделируется напряжённо деформированное состояние трубы подземного газопровода в области каверны в грунте. Производится оценка остаточного ресурса стального подземного газопровода, содержащего локальные дефекты. Моделируются квазистатические предельные состояния газопроводов. Вычисления производятся численными методами с использованием программного комплекса ANSYS и MATHCAD. Даны рекомендации по оптимизации эксплуатации, ремонту и реновации газопроводов.

## ИЗУЧЕНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦА СТАЛИ Х70 ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

**О.А. Насибуллина, Р.Г. Ризванов**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

ksu33@bk.ru

Большинство конструкций, деталей машин в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклически изменяющихся нагрузок, о таких изменениях можно судить по усталости металла. В работе представлены результаты усталостных испытаний. На исследуемом образце имелись характерные для коррозионно - механического разрушения множественные трещины. Показано, что с увеличением количества циклов нагружения происходит рост коррозионной трещины, что приводит к уменьшению его термодинамической устойчивости. Результаты регрессионного анализа показали, что коэффициент корреляции составляет r = 0,99, при использовании трехпараметрической логарифмической функции.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИИ ОРИЕНТАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ ПРИ МНОГООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СО СДВИГОМ ФАЗ

**А.Д. Никитин[1], Н.Г. Бураго[2], И.С. Никитин[1], Б.А. Стратула[1]**

[1]*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва*

[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

nikitin_alex@bk.ru

Получено аналитическое решение задачи определения ориентации критической плоскости и оценки усталостной долговечности при многоосном циклическом нагружении с произвольным сдвигом фаз для классического диапазона усталости (малоцикловая и многоцикловая усталость). Проведены расчеты напряженного состояния, определены зоны максимальной концентрации напряжений и на этой основе даны оценки усталостной долговечности ответственного элемента конструкции – диска компрессора газотурбинного двигателя для полетного цикла нагружения.

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

**В.А. Оборин, М.А. Соковиков, О.Б. Наймарк**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

oborin@icmm.ru

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в сплавах алюминия АМг6, Д16Т и титана ВТ-6 в режиме сверхмногоцикловой усталости на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при предварительном динамическом деформировании на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до ~$10^3$ $с^{-1}$. Актуальность поста-

новки определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полётного цикла при случайных динамических воздействиях.
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01186.

## МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ МНОГО- И МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

**Э.С. Оганьян**

*Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ), Коломна*

vnikti@ptl-kolomna.ru

Рассмотрены модели накопления повреждаемости в элементах конструкций машин в процессе их нагружения в много- и малоцикловой области. Установлено, что процесс накопления повреждений в этих условиях не подчиняется линейной гипотезе. Показано влияние предварительного малоциклового нагружения на предел выносливости детали, и обоснована необходимость учета одновременного действия комплекса эксплуатационных нагрузок разного уровня с формированием обобщенного блока сил. Предложена универсальная модель усталости металлов при комбинированном нагружении детали.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЧЕТАНИИ С ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЕЙ

**И.Н. Одинцев[1], Т.П. Плугатарь [1], А.С. Плотников [2]**

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Москва*

[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

ino54@mail.ru

Обобщены различные аспекты, касающиеся исследования остаточных напряжений в материалах и элементах конструкций с использованием электронной цифровой спекл-интерферометрии. Основное внимание уделено методам зондирующих отверстий и наращиваемой прорези. Испытания могут проводиться как в лабораторных, так и в полевых условиях (с помощью специального оборудования). Представлены оригинальные методические разработки и результаты их практического применения, демонстрирующие особенности и преимущества рассмотренных подходов.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00572.

## О МАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ (на примере морского ледяного покрова)

**Н.М. Осипенко**

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва*

osipnm@mail.ru.

Для ледяного покрова характерно развитие структур разрушения в локальном и региональном масштабах с участием процессов разрушения, реализующихся в масштабах, отличающихся друг от друга на несколько порядков. Можно выделить класс материалов, к которым, в частности, относится морской лед и другие зернистые и структурированные материалы (гипс, бетон, парафин и др.), на эффективную трещиностойкость которых при хрупком разрушении влияет масштабный фактор, в роли которого выступает градиент внешних напряжений. Данное воздействие, возмущая напряженное состояние в немалой концевой области вершины трещины и меняя ее размер, создает возможность изменения эффективной трещиностойкости для процессов разрушения в окрестностях концентрации напряжений. В концевых зонах магистральных разрывов материала создаются множественные нарушения (микротрещины, приуроченные к элементам микроструктуры) При этом сохраняется доля несущей способности. Аналогичные явления наблюдаются при развитии магистрального разрыва в крупномасштабных фрагментах морского ледяного покрова, имеющего столбчатозернистую структуру и капиллярную пористость. Описанный процесс объясняет генезис структуры концевой зоны крупномасштабных разрывов в ледяном покрове. Этот механизм также создает принципиальную возможность ранней диагностики повреждений в окрестностях концентраторов напряжений для материалов, обладающих аналогичной тенденцией изменения эффективной трещиностойкости, поскольку появление малых трещин в условиях высокого градиента напряжений (и пониженной локальной трещиностойкости), обозначая инициирование разрушения, не приводит к их распространению в неустойчивом режиме. Предложена модель этого явления при изменении масштаба области разрушения. На примере морского ледяного покрова проведены оценки влияния эффекта на сценарии разрушения.
Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН №I.2.55П.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

**В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Самара*

pavlov.vf@ssau.ru

В машиностроении широко применяются различные методы поверхностного упрочнения, которые приводят к существенному повышению предела выносливости деталей с концентраторами напряжений. Для оценки влияния упрочнения на предел выносливости используются два критерия: остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали и среднеинтегральные остаточ-

ные напряжения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. В исследовании установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений наиболее точно отражает связь между пределом выносливости и распределением остаточных напряжений в опасном сечении детали.

## АВТОМОДЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ РОСТА ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ТРЕХСЛОЙНОМ НИЗКОПРОНИЦАЕМОМ ПЛАСТЕ

**Г.В. Падерин**

*Научно-технический центр «Газпром нефти», Санкт-Петербург*

paderin.gv@gazpromneft-ntc.ru

В представленной работе проведен анализ уравнения роста трещины гидроразрыва по модели Pseudo3D для трехслойного пласта и найдено, что при пренебрежении утечками жидкости ГРП с помощью преобразования переменных можно найти автомодельное решение для роста трещины ГРП, зависящее только от одного аргумента. Полученный результат позволяет проводить быструю оптимизацию трещин гидроразрыва при концептуальном проектировании процесса разработки месторождения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027). Индустриальный партнер гранта – Научно-технический центр «Газпром нефти».

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ

**В.А. Пахомов, М.А. Большухин, А.В. Козин, В.А. Панов**

*АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород*

vapanov@okbm.nnov.ru

Приводится математическая модель неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах оборудования и систем реакторных установок (РУ), построенная на базе уравнений механики поврежденной среды. Результаты верификации модели, а также сопоставительный анализ результатов расчетов и результатов экспериментальных исследований подтвердили адекватность моделирования этих процессов с использованием разработанной модели.

## КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВИНТОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТАХ

**М.Н. Перельмутер**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

perelm@ipmnet.ru

Исследование концентрации напряжений в винтовых стоматологических имплантатах и костной ткани выполнено на модели винтового соединения имплантата и кости. Полагалось, что углубления в губчатой кости, образующиеся при внедрении имплантата в костную ткань, соответствуют резьбе на имплантате. Рассмотрено влияние контактных условий на границе соединения имплантат-кость на величину концентрации напряжений в имплантате и костной ткани. Исследовано влияние геометрических параметров резьбы: шага, формы и глубины на распределение напряжений в имплантате и кости.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ АААА-А17-117021310386-3) и поддержке грантов РФФИ №17-08-01312 и №17-08-01579.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ И САМОЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИН

**М.Н. Перельмутер**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

perelm@ipmnet.ru

Разработаны физико-механические модели для анализа процессов формирования и самозалечивания трещин в композиционных материалах, основанные на кинетической концепции разрыва/восстановления связей в концевой области трещины. При анализе формирования трещин полагается, что в материале имеется ослабленная когезионная зона, которая рассматривается как трещина, заполненная связями. Распад связей рассматривается как термофлуктуационный процесс. Самозалечивание трещины рассматривается как кинетический процесс восстановления связей между берегами трещины (формирование концевой области).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-19-00616.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВО ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

**А.Е. Прохоров, М.С. Желнин, А.А. Костина, О.А. Плехов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Prokhorov.a@icmm.ru

В представленной работе авторами разработана экспериментальная установка для анализа кинетических параметров фазового перехода и эволюции напряженно-деформированного состояния образца вызванного пучением грунта в процессе фазового перехода на основе волоконно-оптической системы. Так же в работе рассматривается решение связанной задачи для описания фазового перехода с учетом наличия незамерзшей поровой влаги в области отрицательных температур. В работе применена методика решения обратной задачи теплопроводности для идентификации материальных параметров сухого грунта, используемого в рамках проведения серии экспериментов по замораживанию и оттаиванию водонасыщенного грунта.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01204.

## ВЛИЯНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАСТЯЖЕНИЕМ И КРУЧЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ ЗОН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ

**Е.А. Путилова, С.М. Задворкин, Э.С. Горкунов**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

tuevaevgenya@mail.ru

В работе приведены результаты исследований микроструктуры, механических и магнитных свойств металла различных зон сварных соединений (основного металла, материала околошовной зоны (ОШЗ) и материала шва) высокопрочной трубной стали, изготовленной по технологии контролируемой прокатки, класса прочности Х80. Исследовано влияние различных схем нагружения на магнитных характеристики металла из всех трех зон сварных соединений. Установлены магнитные параметры, однозначно характеризующие изменение напряженно-деформированного состояния отдельных зон сварного соединения в определенном диапазоне приложенных напряжений.Исследования выполнены в рамках стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-150.2018.1. При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ЖЕСТКИХ И ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

**П.А. Радченко, С.П. Батуев, А.В. Радченко, В.Б. Максимов**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

*spbatuev@gmail.com*

В работе представлены результаты комплексного экспериментально-численного исследования разрушения железобетонных плит на жестких и податливых опорах при динамическом воздействии. Экспериментальные исследования проводились на кафедре ЖБК ТГАСУ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 18-41-703003 и № 18-48-700035.

## ВАРИАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ О СКЛЕЙКИ УПРУГИХ ТЕЛ

**Е.М. Рудой[1,2], А.И. Фурцев [1]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

rem@hydro.nsc.ru

В работе рассматривается плоская задача теории упругости о равновесии двух упругих тел, склеенных друг с другом на части их общей границы. На оставшейся части имеется трещина отслоения, на берегах которой задаются условия непроникания и трения. Тела находятся в равновесии под действием сил, приложенных к внешним границам тел. В работе проводится комплексное исследование задачи: обоснование корректности соответствующей математической модели, исследование качественных свойств решения, построение численного алгоритма решения и проведение численных экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-51-50004.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ФАЗ НА ОСНОВЕ АЛЛОТРОПОВ УГЛЕРОДА

**Л.Х. Рысаева, Ю.А. Баимова**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

lesya813rys@gmail.com

Изменение структуры и свойств алмазоподобных фаз представляет большой интерес, поскольку они имеют широкий спектр применений. В данной работе поведение устойчивых углеродных алмазоподобных фаз изучается методом молекулярной динамики. Для примера рассмотрено три фазы (CA3, TA3 и LA3). Структурные превращения при гидростатическом растяжении и сжатии изучаются, чтобы объяснить механизмы деформирования, а также найдены критические напряжения и описано влияние температуры на деформацию.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-1651.2018.2).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

**Н.В. Савельева**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

saveleva@icmm.ru

Работа посвящена изучению поведения алюминиевого сплава АМг6 при ударно-волновом нагружении применительно к эффектам, определяющим механизмы формирования упругопластического фронта, а также особенностям откольного разрушения сплава при различных скоростях деформирования. Проведена серия численных расчетов, которая позволила оценить затухание упругого предвестника и изменение откольной прочности при росте скорости деформации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00867.

## О ВЛИЯНИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

**В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, О.Ю. Семёнова, Н.А. Сургутанов**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Самара*

sazanov.vp@ssau.ru

Для оценки влияния различных методов поверхностного упрочнения на сопротивление усталости деталей необходимо знать не только величину сжимающих остаточных напряжений на поверхности, но и распределение этих напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя. Используя конечно-элементное моделирование, проведены расчёты для различных вариантов распределения первоначальных деформаций, заданных в виде алгебраических функций. В исследовании были определены закономерности изменения коэффициента интенсивности напряженийс увеличением глубины усталостной трещины в упрочнённых деталях при различных вариантах распределения первоначальных деформаций.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ И БИМОДАЛЬНОЙ СТРУКТУРАМИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ, ДИНАМИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

**Э.В. Сафин [1], С.П. Малышева[2], Р.М. Галеев [2], А.Н. Ермоленко [1]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

edsafin@ufamail.ru

В работе исследовались механические свойства титанового сплава ВТ6 со стандартной равноосной микрокристаллической структурой (МК), однородной субмикрокристаллической структурой (СМК) и бимодальной субмикро-микрозеренной структурой при статическом, динамическом и циклическом нагружениях. Показано, что сплав с однородной СМК структурой обладает по сравнению с МК сплавом повышенной твердостью, прочностью и сопротивлением усталости, однако, ударная вязкость в сплаве с СМК структурой существенно ниже. Сплав с бимодальной структурой, который при сопоставимых с СМК состоянием характеристиках твердости, прочности и сопротивления усталости обладает заметно большей пластичностью и ударной вязкостью.

## К ВОПРОСУ КОРРЕКТНОСТИ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАКРЕПЛЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА С НЕПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

**Г.Ф. Сафина[1], А.М. Ахтямов [2]**

[1]*Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета, Нефтекамск*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

safinagf@mail.ru

В представленной работе поставлена задача о корректности решения обратной задачи и получения алгоритма решения при известных приближенных значениях частот колебаний участка трубопровода с непротекающей жидкостью. Показана корректность решения обратной задачи по А.Н. Тихонову, для чего построен компакт, удовлетворяющий требуемым условиям корректности. При построении компакта учтены вид частотного уравнения прямой задачи и метод решения обратной задачи. Построен алгоритм решения задачи, основанный на выделении наибольшего по модулю минора матрицы системы из 9-ти уравнений и дальнейшем определении элементов матрицы коэффициентов краевых условий, лежащих в построенном множестве корректности по А.Н. Тихонову.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Башкортостан в рамках научного проекта №17-41-020230-р_а

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

**А.Р. Сафиуллин, Р.В. Сафиуллин**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

dr_rvs@mail.ru

В работе приведено описание методики и установки для неразрушающего контроля и результаты контроля полых ячеистых конструкций с помощью цифрового голографического интерферометра (ЦГИ). По данному методу с помощью лазерного излучения на цифровую видеокамеру регистрируются два (или более) голографических изображения исследуемого объекта, соответствующих различным фазам процесса деформирования поверхности под действием внешней нагрузки. Путем цифровой обработки поле разности фаз может быть преобразовано в поле перемещений поверхности объекта, которые произошли в промежутке между первой и второй экспозициями. Основными преимуществами метода является бесконтактность, высокая чувствительность к перемещениям (доли микрона), возможность проведения измерений одновременно по всей поверхности изделия, возможность проведения измерений независимо от формы и материала изделия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН: АААА-А17-117041310221-5.

## МЕТОДИКИ И УСТАНОВКИ ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ ЯЧЕИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Р.В. Сафиуллин**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

dr_rvs@mail.ru

Работа выполненав сотрудничестве с РФЯЦ ВНИИТФ, ПАО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Для оценки качества изготовления полых конструкций, их несущей способности, механических, усталостных и технологических свойств разработана целая серия разнообразных методик. В работе подробно описаны методики: 1. исследования технологических свойств материалов (свариваемость в твердом состоянии и формуемость в условиях сверхпластичности); 2. исследования качества изготовления полых конструкций; 3. методики оценки несущей способности полых конструкций; 4. методики испытаний на сжатие, кручение и баллистический удар компонентов полых лопаток; 5. методики усталостных испытаний плоских образцов и компонентов полых лопаток. Приведены результаты исследований и испытаний, полученные с помощью разработанных методик.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН: АААА-А17-117041310221-5.

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**П.Б. Северов**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва*

alpinprom@yandex.ru

Исследованы процессы накопления повреждений при квазистатическом и повторно статическом растяжении однонаправленных слоистых углепластиков методом акустической эмиссии. Показана возможность оценки степени повреждениямaтериала при неупругом деформировании и разрушении.

## ВЛИЯНИЕ УМЗ СТРУКТУРЫ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

**С.Н.Сергеев [1], Г.Ф. Корзникова [1], И.М.Сафаров [1],Р.М.Галеев [1], С.В.Гладковский [2], Д.А.Двойников [2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

nikocem17@gmail.com

Методом теплой прокатки и всесторонней изотермической ковки получена ультрамелкозернистая структура равноосного и волокнистого типа в низкоуглеродистой стали 05Г2МФБТ. Показано, что ультрамелкозернистая (УЗМ) низкоуглеродистая сталь имеет более высокий уровень сопротивления разрушению при ударном изгибе относительно исходной мелкозернистой стали. Установлено, что ударная вязкость низкоуглеродистой стали после теплой прокатки и всесторонней изотермической ковки возрастает по сравнению с состоянием после контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. Показано, что наличие в стали волокнистой УМЗ структуры является эффективным барьером для зарождения и распространения трещины вплоть до температуры минус 100 °С.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА, МОДИФИЦИРОВАННОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ МИНЕРАЛОВ

**А.В. Сказочкин[1], С.В. Кислов [2]**

[1]*Калужский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Калуга*

[2]*ООО «Научно-производственный центр «Технологии минеральных покрытий», Калуга*

avskaz@rambler.ru

Представлены некоторые результаты исследования строения, микроструктуры и дефектов поверхностного слоя металла (сталь 20Х13), модифицированного по технологии минеральных покрытий на поперечном шлифе с использованием металлографического микроскопа NIKONMA200.Установлено, что образецимеет три слоя, отличающихся разной степенью травимости. Верхний слой не содержитдефектов, промежуточный слой предположительно отличается повышенной хрупкостью, третий слой,примыкающий к основному металлу, прослеживается не всегда. Зона перехода к основному металлу четкая,особых признаков по отношению косновному металлу образца не имеет.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА НА ОБРАЗЦАХ ТИПА «КОЛОКОЛЬЧИК» В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

**С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин, А.В. Копеина**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

alexandra.kopeina@yandex.ru

Большое значение имеет исследование пластичности материала в различных условиях напряженного состояния. В условиях чистого сдвига основным видом испытаний пластичности является кручение цилиндрических образцов. Ранее предложен образец типа

«колокольчик», позволяющий проводить исследования в условиях растягивающих и сжимающих напряжений, когда коэффициент напряженного состояния равен $k$ =1,2 и $k$ =-1. Однако данные образцы не позволяют проводить исследования в условиях промежуточных значений $k$ . В данной работе выполнена модернизация формы и размеров предложенного образца, для того, чтобы иметь возможность исследовать деформационную способность материалов в условиях промежуточных значений коэффициента напряженного состояния. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИМАШ УрО РАН.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА Al/SiC НА МАКРО- И МИКРОМАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

**С.В. Смирнов, А.В. Коновалов, М.В. Мясникова, Ю.В. Халевицкий, А.С. Партин**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбуг*

marina@imach.uran.ru

Разработана вычислительная модель, связывающая процесс разрушения при пластической деформации представительного микрообъема металломатричного композита Al/SiCc накоплением поврежденности, возникновением и развитием макротрещины. Численная реализация модели выполнена для плоскодеформированного состояния однородного растяжения и сжатия. С применением феноменологической модели механики поврежденности В.Л. Колмогорова сформированы расчетные траектории развития микротрещин в матрице композита. Результаты моделирования позволили связать степень микроразрушения композита, оцениваемую по суммарной расчетной длине микротрещин, со степенью рассеянного разрушения на макроуровне.

## ПОВРЕЖДЕННОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

**С.В. Смирнов**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

svs@imach.uran.ru

Представлены результаты исследований в области механики поврежденности материалов при пластическом формоизменении, полученные в рамках Уральской научной школы деформируемости за последние годы. Описаны модели, позволяющие прогнозировать накопление деформационной поврежденности в условиях сложного напряженного состояния, немонотонного нагружения, учитывающие возможность залечивания поврежденности при температурном воздействии. Приведены примеры использования моделей для решения практических инженерных задач.

## АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С ТРЕЩИНАМИ: ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ РОСТА ТРЕЩИНЫ (ОБОБЩЕННЫЕ КРИТЕРИИ РОСТА ТРЕЩИНЫ И МЕТОД МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ)

**Л.В. Степанова, С.А. Бронников**

*Самарский национальный исследовательский университет имени акад. С.П. Королева, Самара*

stepanovalv@samsu.ru

Дана оценка направления роста трещины в условиях смешанного нагружения в изотропном линейно упругом материале посредством двух подходов: с помощью обобщенных критериев классической континуальной линейной механики разрушения (ЛМР) и атомистического моделирования, выполненного методом молекулярной динамики в пакете LAMMPS (Large-scale Molecular Massively Parallel Simulator). В рамках классической ЛМР использовались критерии: максимального тангенциального напряжения; минимума плотности упругой энергии деформации; максимальной окружной деформации. С помощью двух подходов получены углы направления роста трещины для различных значений параметра смешанности нагружения, задающего вид нагружения.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00571.

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: МЕТОД ФОТОУПРУГОСТИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ М. УИЛЬЯМСА ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

**Л.В. Степанова, В.С. Долгих, Ю.Н. Бахарева**

*Самарский национальный исследовательский университет имени акад. С.П. Королева, Самара*

stepanovalv@samsu.ru

Приведены результаты числовой обработки результатов оптоэлектронных измерений, проведенных с помощью метода цифровой фотоупругости. Целью экспериментов является исследование смешанного деформирования пластин с двумя горизонтальными и наклонными трещинами, с двумя горизонтальными и наклонными боковыми надрезами и построение многопараметрических асимптотических разложений М. Уильямса поля напряжений в окрестности вершин трещин. Предложен эффективный алгоритм вычисления коэффициентов высших приближений в асимптотических разложениях компонент тензора напряжений. В работе приводятся вычисленные значения коэффициентов высших приближений полей напряжений для пластин с двумя трещинами и надрезами. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00631.

## НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

**Е.М. Струнгарь, Т.В. Третьякова, Д.С. Лобанов, В.Э. Вильдеман**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр экспериментальной механики, Пермь*

cem.spaskova@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию полей деформаций в телах с концентраторами с использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D.Рассмотрены методические особенности использования данного метода при изучении композиционных материалов. Проведены экспериментальные исследования механического поведения композитов с учетом структурных и размерных параметров в зонах концентраторов. Получены результаты оценки влияния размера концентратора напряжений относительно параметров структуры слоисто-волокнистого композиционного материала при изучении процессов неупругого деформирования и разрушения. Работа выполнена при поддержке гранта РФИИ № 18-01-00763.

## НЕЛОКАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ КВАЗИХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

**С.В. Сукнев**

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск*

suknyov@igds.ysn.ru

Для расширения области применения нелокальных критериев разрушения на квазихрупкие материалы предложены модифицированные критерии, содержащие комплексный параметр, характеризующий размер зоны предразрушения и учитывающий не только структуру материала, но также пластические свойства материала, геометрию образца и условия его нагружения. В соответствии с модифицированными критериями получены выражения для разрушающего напряжения в задачах об одноосном растяжении, одноосном сжатии и совместном растяжении со сжатием плоских образцов с круговым отверстием. Результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00323.

## РАЗРУШЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

**К.С. Султанов[1], С.И. Исмоилова [1], Ш.Э. Туланов [2]**

[1]*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз*

[2]*Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности*

sultanov.karim@mail.ru

Приведены результаты экспериментов и их анализ по растяжению волокнистой композитной нити (хлопковой пряжи) до обрыва. Анализ критических напряжений и деформаций, при которых обрывается композитная нить, показывает, что разрушения (обрыв) нити происходит не за счет обрыва волокон, составляющих нить, как ранее предполагалось, а за счет их относительного проскальзывания и далее выскальзывания из нити.

## РАЗРУШЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГРУНТОМ

**К.С. Султанов[1], П.В. Логинов [1], Б.Б. Рихсиева[1], Ж.Х. Кумаков [2]**

[1]*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз*

[2]*Ташкентский архитектурно-строительный институт*

sultanov.karim@mail.ru

Приводится численное решение связанных одномерных волновых задач о распространении продольных волн в грунтовом полупространстве и подземном трубопроводе. Определены продольные напряжения в трубопроводе на различных его сечениях от начального сечения, которые совпадают с начальным сечением грунтового полупространства. Показано многократное увеличение продольного напряжения в трубопроводе по сравнению с амплитудой волны в грунтовой среде. На основе анализа результатов расчетов, выявлены механизмы образования продольных напряжений в трубопроводе и причины их многократного увеличения.

## АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И НАКОПЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

**Д.А. Третьяков[1], А.К. Беляев [1,2], А.Р. Галяутдинова [1], В.А. Полянский [1,2], А.С. Семенов [1]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

[2]*Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург*

dmitry.tretyakov93@yandex.ru

Исследована акустическая анизотропия металлов при пластической деформации и накоплении повреждений. Применен метод угловых диаграмм акустической анизотропии, позволяющий определить ориентацию главных осей механических напряжений при неразрушающем контроле конструкций. Получены соотношения, связывающие главные значения тензора поврежденности с акустической анизотропией и скоростями ультразвуковых волн, для оценки остаточного ресурса до разрушения. Относительное расхождение расчетных и экспериментальных значений акустической анизотропии при использовании явной схемы симметризации тензора эффективных напряжений не превосходит 5%. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-19-00413.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВБЛИЗИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

**В.А. Туркова**

*Самарский университет, Самара*

turkovava@samsu.ru

Элементы реальных конструкций испытывают воздействие различных температур и нагрузок, протяженное во времени. Эффективное проектирование сложной структуры (агрегата, элемента конструкции) зависит от развития точных аналитических и числовых моделей. Особенно важным для этого является полное понимание механизмов развития повреждений и их взаимодействий между собой. Необходима возможность сочетания модели материала с законом накопления повреждений. В работе представлена модель поврежденности, основанная на механике повреждения сплошных сред.Модель материала добавляется в расчет в виде пользовательской подпрограммы (UMAT) в коммерческом конечно-элементном пакете Simulia ABAQUS.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-01-00631.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ ТИПА РАССЛОЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МДТТ ПО ПОКАЗАНИЯМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ

**А.С. Урнев[1,2], А.С. Чернятин[1,3]**

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

[2]*АО НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля, Москва*

[3]*ООО «Транснефть», Москва*

Urnev-AS@yandex.ru

В докладе показаны методический подход и алгоритмы работы программ, направленных на оценку и определение геометрических и локализационных параметров дефектов типа расслоения в слоистых композитных материалах, основанные на решении обратных задач МДТТ с помощью информации, получаемой с помощью волоконно-оптических датчиков деформации. Подход к решению обратных задач основан на минимизации целевой функции, отражающей разность между экспериментальными и расчетными данными. В качестве базового метода решения используется метод деформируемых симплекс-элементов (метод Нелдера-Мида). Подход реализован в виде ряда макросов для ПК ANSYS и программ с графическим интерфейсом для ПК MATLAB.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00886 А.

## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРЖЕННОЙ НИЗКОСКОРОСТНОМУ УДАРУ

**А.Н. Федоренко[1],Б.Н. Федулов[1], Е.В. Ломакин [2]**

[1]*Центр Проектирования, производственных технологии и материалов, Сколковский институт науки и технологий, Москва*

[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

alexey.n.fedorenko@gmail.com

Целью исследования является разработка подхода для консервативной оценки остаточной прочности слоистого композиционного материала, подверженного низкоскоростному удару, избегая прямого моделирования динамического процесса. При ударе часть кинетической энергии ударника тратится на расслоение, растрескиваниематрицы и интерфейса, разрушение волокна и другие возможные формы повреждения материала. Исходя из данных о соотношениях в распределении кинетической энергии ударника на различные формы повреждений, на основе алгоритмов топологической оптимизациипредложен метод определениянаихудшего распределения параметров повреждения.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ МАКРОРАЗРУШЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИН ПРИ СЛУЧАЙНОМ РАЗБРОСЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Е.В. Феклистова, В.Э. Вильдеман**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

*cem.feklistova@mail.ru*

В работе рассматриваются условий макроразрушения пластин при случайном разбросе прочностных свойств структурных элементов. Для этого проводится вычислительный эксперимент по нагружению пластин с концентраторами напряжений с использованием двухуровневой структурно-феноменологической модели. Изложенная модель реализуется путём написания алгоритма поэтапного разрушения на языке программирования APDL. В результате расчёта получаем картины зон разрушения и диаграммы деформирования в осях «Сила-перемещение» при варьировании характеристик закона распределения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-00069.

## ВЛИЯНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ВЫДЕРЖКИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ -10℃ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ ЧЕРЕЗ ПРОСЛОЙКУ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

**Р.Г. Хазгалиев [1], М.Ф. Имаев [1,2], Р.Р. Мулюков [1,2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

sloth-usatu@mail.ru

Исследовали влияние времени и давления сварки, а так же последующей кратковременной выдержки при температуре -10℃, на прочность при комнатной температуре диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку из никелевого сплава Х2Н98. Наибольшая прочность соединения в 490 МПа достигалась после сварки под давлением 12 МПа при 700℃ в течение 20 мин. Кратковременное охлаждение до -10 °С привело к уменьшению прочности до 300 МПа. Механические свойства соединения обсуждаются с учетом влияния легирующего элемента хрома прослойки на температурный интервал аустенитно - мартенситного превращения в образующемся слое интерметаллида TiNi.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИПСМ РАН №АААА-А17-117041310221-5 и АААА-А19-119021390106-1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИНОВЫХ ПЛАСТИН С КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ ИЛИ ЖЕСТКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

**Н.В. Харинова**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск*

n.kharinova@sibstrin.ru

В работе представлено исследование концентрации напряжений и деформаций в пластинах с круглым отверстием или жестким включением. Эксперименты выполнены методом нелинейной фотоупругости на моделях из пьезооптического полиуретана СКУ-6. Изучались конечные деформации с учетом изменения геометрии моделей в плоскости и по толщине. Построены графики изменения коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в зависимости от величины номинальных деформаций.

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА КОМПОНЕНТОВ В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ НА ЕГО ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

**К.А. Хвостунков**

*МГУ им.М.В.Ломоносова, Механико-математический факультет, Москва*

khvostunkov@gmail.com

Время до разрушения определяется как момент, в который значение меры поврежденности достигает критической величины. Кинетическое уравнение для меры поврежденности строится на основе потенциала диссипации, зависящего от энергетической пары к исходной мере поврежденности. Конкретный вид этой переменной определяется видом термодинамического потенциала, входящего в локальное уравнение энергии и неравенство Клаузиуса-Дюгема. В решении учитывается диссипация энергии как при разрушении границ раздела, так и в результате трения ввиду разрыва поля перемещений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-01739.

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРЕН НА РАСПЫЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

**Р.Х. Хисамов[1], К.С. Назаров [1], Р.У. Шаяхметов [1], Ю.М. Юмагузин [1,2], Р.Р. Мулюков [1,2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

r.khisamov@mail.ru

Исследовано влияние размера зерен от 5 мкм до 180 нм на изменение поверхности никеля в результате ионного распыления. Ионное распыление проведено в тлеющем разряде. Показано, что снижение размера зерен приводит к снижению шероховатости поверхности металла при ионном распылении. Максимальная высота рельефа поверхности снижается от нескольких сотен нанометров при мелкозернистом значении размера зерен до нескольких десяток нанометров при наноструктурном значении размера зерен.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310213-0.

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТЕКСТУРЫ НА РАЗРУШЕНИЕ СТАЛИ

**Н.К. Ценев[1], Г.И. Рааб [2]**

[1]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

nktsenev@yandex.ru

Представлены результаты исследования взаимосвязи кристаллографической текстуры, структуры и остаточных макронапряжений на развитие процессов разрушения образцов стали марки 20 , полученных прокаткой,при испытаниях на ударный изгиб с V-образным надрезом**.** Показано, что с увеличением уровня внутренних остаточных напряжений условный предел текучести и временное сопротивление увеличиваются, а разница уменьшается. Установлено, что характер распространения трещин при испытаниях на ударный изгиб также зависит от уровня макронапряжений и текстуры. Полученные данные могут служить основой прогноза долговечности и работоспособности изделий из стали марки 20 полученных прокаткой.

## УДАРНАЯ СТОЙКОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОРПУСА ВЕНТИЛЯТОРА ИЗ ПКМ С БРОНЕЗАЩИТНЫМИ СЛОЯМИ

**А.А. Чернышов, А.Ю. Ежов**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

aachernyshov@ciam.ru

В рамках работы выполнены проектирование и изготовление экспериментального корпуса с «мягкой» стенкой. Проведены испытания экспериментального корпуса при ударе металлическим имитатором лопатки и верифицирован расчетный метод.

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**С.С. Чугунов, И.В. Сергеичев, С.Д. Конев, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

S.Chugunov@skoltech.ru

Аддитивные технологии производства керамических изделий, основанные на принципе стереолитографии, открывают широкие возможности по изготовлению деталей со сложной геометрией. Однако, данная технология содержит в себе ряд особенностей, которые существенным образом влияют на микроструктуру и механическое поведение получаемых изделий. В докладе представлены: описание аддитивной технологии производства изделий, механического поведения 3D-печатных керамических материалов, оптимизированная методика проведения механических испытаний, а также оценки неопределенностей, возникающих в процессе тестирования, и их влияния на конечный результат.

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ БИОПОВРЕЖДЕНИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ БЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

**Ф.Р. Шакирзянов, Р.А. Шакирзянов, В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев**

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань*

faritbox@mail.ru

Рассматривается задача учета влияния продуктов жизнедеятельности бактерий или микроорганизмов на прочностные и жесткостные характеристики бетонов различных классов. В результате этих воздействий с течением времени уменьшается прочность и жесткость бетона, что приводит к уменьшению несущей способности конструкции и ее долговечности. Поэтому для конструкции, находящейся в среде с повышенным количеством бактерий или микроорганизмов, необходимо установить срок ее безопасной эксплуатации и уметь определять время последующей реконструкции.Учет воздействия агрессивной среды на бетон учитывается в работе на основе 2-го закона Фика. Полученное уравнение решается численно методом конечных разностей. Для установления определяющих параметров процесса проникновения агрессивной в бетоне были проведены лабораторные и численные эксперименты, и на их основе выявлены закономерности влияния агрессивной среды на прочность бетона.Также проведены исследования влияния скорости диффузии, концентрации и времени воздействия агрессивной среды на несущую способность конструкции.

Исследования проводились в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 9.5762.2017/ВУ (проект № 9.1395.2017/ПЧ), гранта РФФИ (проект № 19-08-00349) и за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 1.12878.2018/12.1.).

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ТРЕЩИН В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЯХ

**А.А. Шамина**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

anashamina90@mail.ru

Исследуется проблема взаимного влияния трехмерных диско-образных трещин, расположенных в параллельных плоскостях упругой среды. Среда находится под действием растягивающего напряжения в направлении перпендикулярном плоскостям трещин. Трещины моделируются математическими разрезами сплошной среды с возможностью сильного разрыва поля перемещений на берегах разреза. Решение строится численно с использованием метода разрывных смещений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-07-01111.

## КОНЕЧНОМЕРНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ И ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ В МОДЕЛИ ГИДРОРАЗРЫВА PLANAR3D В БЕЗРАЗМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

**Е.В. Шель[1,2], Н.А. Шаповаленко [2]**

[1]*Газпромнефть НТЦ, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург*

Shel.EV@gazpromneft-ntc.ru

Доклад посвящён модели гидроразрыва пласта Planar3D. Уравнения модели сведены к безразмерной форме, выделены ключевые безразмерные параметры, характерные величины которых задают асимптотические переходы к известным аналитическим моделям. Показано, что задача гидроразрыва в постановке Planar3D в многослойной среде имеет 4 нетривиальных параметров, изменяющихся при аффинных преобразованиях входных параметров, и большое количество тривиальных параметров, неизменяющихся с линейными преобразованиями входных параметров, пропорциональное количеству слоёв среды. Рассматриваются пути решения «проклятия размерностей» для построения метамодели Planar3D.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

**Д.Н. Шишулин [1], В.А. Клюшников [2], В.В. Мишакин [2]**

[1]*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород*

[2]*Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН, Нижний Новгород*

slavchuk2@yandex.ru

В работе рассмотрены вопросысовместного применения модели механики поврежденной среды (МПС) и физических методов неразрушающего контроля для определения выработанного и прогноза остаточного ресурса конструктивных элементов ответственного оборудования. В основу заложено влияние степени деградации на акустические и магнитные свойства стали аустенитного класса 08Х18Н10Т при малоцикловом нагружении, приведена их количественная оценка. Используя полученные характеристики, была дополнена модель МПС для учета изменения фазового состава стали и кинетики накопления повреждений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00637.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

**В.Н. Шлянников, А.В. Туманов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»*

fog@knc.ru

Предложена концепция нелинейных коэффициентов интенсивности напряжений в качестве однопараметрической характеристики сопротивления росту трещины учитывающей как нелинейные свойства материала, так и эффекты стеснения. Разработаны численно-аналитические алгоритмы нахождения интегральных функций, описывающих напряженно-деформированное состояние в области вершины трещины для упруго-пластических и упруго-вязких сред. Экспериментально подтверждена чувствительность предлагаемых параметров к условиям нагружения и свойствам материала. Обосновано приложение нелинейных коэффициентов интенсивности напряжений к задачам оценки прочности и долговечности элементов конструкций.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТАНДАРТНОГО ОБРАЗЦА МЕТОДАМИ ГРАНИЧНИХ И КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**С.С. Щербаков [1, 2], Л.А. Шемет[2], О.А. Насань [2]**

[1]*Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, Минск*

[2]*Белорусский государственный университет, Минск*

shemetla@yandex.ru

Представлены результаты сравнения гранично-элементного и конечно-элементного расчета напряженного состояния компактного образца и соответствующих опасных объемов (площадей). В рамках рассматриваемой модели опасные объемы представляют собой области, где напряжения достигают повреждающего уровня, например, нижней границы рассеивания предела выносливости. Анализ показал хорошее соответствие результатов гранично-элементного моделирования напряженного состояния и объемной повреждаемости, основанного на предварительном интегрировании фундаментальных решений, результатам конечно-элементного расчета.

## СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТАРЦИИ ДИФФУЗНО-ПОДВИЖНОГО ВОДОРОДА В СВАРНОМ ШВЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА

**Ю.А. Яковлев**

*Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), Санкт-Петербург*

yura.yakovlev@gmail.com

В работе рассматривается влияние небольших концентраций водорода на механические свойства стали. Приведены результаты экспериментального исследования ультразвуковой обработки (UltrasonicPeening) околошовной зоны на распределение концентраций водорода и малоцикловую усталость. Сделан вывод о снижении концентрации диффузно-подвижного водорода до трех раз в области сварного шва после такой обработки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-31-00329, 18-08-00201, 17-08-00783.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ «ВЯЗКОГО» РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

**Е.В. Туч [1], М.Н. Кривошеина [1,2]**

*[1]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск.*

*[2]Томский государственный университет, Россия, Томск.*

elenatuch@yandex.ru

В работе представлены результаты численных расчетов динамического нагружения преград из анизотропного алюминиевого сплава Д16Т при различной ориентации направления нагружения относительно направления прокатки. В ходе работы были определены динамические пределы упругости и откольной прочности сплава Д16Т в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению прокатки. Показано хорошее согласие полученных результатов расчетов с исследованиями свойств сплава Д16Т в условиях натурных экспериментов при динамическом нагружении.

## Подсекция III-5. МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

### ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПЛОСКОГО СЛОЯ АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СО СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКОЙ ДЛЯ СМАЗКИ

**А.А. Адамов [1], А.А. Каменских[2], Ю.О. Носов [2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

anna_kamenskih@mail.ru

В рамках работы выполнен анализ фрикционных свойств модифицированного фторопласта, предложены функции, описывающие изменение коэффициента трения в зависимости от уровня давления. Рассмотрено влияние трения на деформационное поведение плоского слоя скольжения сферической опорной части на модели ячейки периодичности. Выполнена серия численных экспериментов для трех вариантов толщины слоя скольжения от 4 до 8 мм с углублением для смазочного материала, при неблагоприятном случае отсутствия смазки. Установлен характер изменения геометрической конфигурации лунки при увеличении уровня давления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00147).

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ ВАЛА И ДИСКА ИЗ РАЗНОИМЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**А.Х. Ахунова, В.А. Валитов, Э.В. Галиева**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

akhunova.a.a@gmail.com

Проведено компьютерное моделирование деформации образцов, имитирующих детали газотурбинного двигателя «диск» и «вал» в ходе сварки давлением, осуществляемой по трем схемам движения вала: внедрение вала в диск, вращение вала в диске и комбинация внедрения и вращения вала. В качестве материала для диска и вала были выбраны сплавы ЭП975 и ЭК79, соответственно. Установлено, что для создания неразъёмного соединения диска и вала предпочтительно использовать сварку давлением, осуществляемую при комбинации внедрения и вращения вала.

Работы по моделированию выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685, данные по механическим свойствам сплавов получены по госзаданию № АААА-А17-117041310215-4.

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВААМг6

**А.Х. Ахунова, А.Х. Валеева, Р.Ф. Фазлыахметов, М.Ф. Имаев**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

akhunova.a.a@gmail.com

**.** В программе DEFORM-3D построена модель сварки трением с перемешиванием образцов из алюминиевого сплава АМг6. Исследовано влияние частоты вращения инструмента на распределение температуры в области сварного соединения. Рассмотрен наконечник конического профиля с углом конусности $10^{o}$и диаметром нижней части 2 мм. Установлено, что при рассмотренной геометрии инструментанаилучшее сварное соединение формируется при частоте вращения 1000 об/мин. Полученные результаты подтверждены натурным экспериментом.

### КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОСНОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО КОНТАКТА

**О.А. Беляк, Т.В. Суворова**

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону,*

o_bels@mail.ru

Проблемы конструирования композитов с заданными антифрикционными свойствами рассматриваются на примере двух типов контактных задач при учете сил трения в области контакта: о движении жесткого штампа, о вибрации штампа с заданной частотой. В качестве основания рассмотрены гетерогенное полупространство и гетерогенный слой, лежащий на недеформируемом основании. В рамках модели гетерогенной среды Био-Френкеля решение контактной задачи сводится к интегральным уравнениям. Исследованы зависимости напряжений в зоне контакта для маслонаполненного композита от пористости, объема вносимого наполнителя, скорости движения штампа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00260-а.

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЛЮИДОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ

**О.А. Беляк**

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону,*

o_bels@mail.ru

Рассмотрены два типа математических моделей для определения механических свойств пористых флюидонасыщенных композитов. Первый подход базируется на принципах микромеханики, второй подход реализован с помощью метода конечных элементов в

программном комплексе ANSYS. Произведено сравнение двух подходов при определении упругих модулей на примере маслосодержащего фенилонаи сравнение с натурным экспериментом.
Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования России (RFMEFI60718X0203).

## ОБ ИНДЕНТИРОВАНИИ НЕОДНОРОДНОЙ ПОЛОСЫ С ПОКРЫТИЕМ

**А.О. Ватульян, Д.К. Плотников, А.А. Поддубный**
*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*
dplotnikov@sfedu.ru

В работе представлен ряд приближенных моделей деформирования неоднородной упругой полосы. В основе моделей лежат гипотезы о характере изменения компонент поля перемещений, отражающих особенности распределения свойств неоднородной структуры по толщине. Построены решения контактной задачи на основе приближенных моделей. Проведен сравнительный анализ моделей, выполнено сравнение результатов с решением, построенным на основе метода конечных элементов. Исследована задача об отслоении покрытия. Построены соотношения для критических значений параметров, при которых возможно отслоение.
Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ № 18-11-00069.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В УПРУГОМ СТЕРЖНЕ

**Я.А. Вахтерова[1], Г.В. Федотенков[1,2]**
[1]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*
[2]*НИИмеханики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
yana-vahterova@mail.ru

Нестационарные обратные задачи механики деформированного твердого тела являются одними из наименее исследованных. Это связано в первую очередь с повышением размерности нестационарных задач на единицу по сравнению со стационарными и статическими задачами. Кроме того, как и в других обратных задачах, здесь возникает проблема, связанная с некорректностью математической постановки, которая в данной работе решается представленными методами. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00438 А.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НЕКОНФОРМНЫХ СЕТКАХ

**А.В. Вершинин [1], Д.А. Коновалов [2], А.В. Кукушкин [2], В. Ан. Левин [1]**
[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
[2]*ООО ”Фидесис”, Москва*
versh1984@mail.ru

В докладе рассматривается подход к численному моделированию упругого взаимодействия между деформируемыми твердыми телами в составе единой конструкции. Предполагается, что тела взаимодействуют друг с другом в процессе деформирования без проскальзывания и разъединения по общим внутренним границам (тела склеены друг с другом). Приводятся примеры задач для верификации разработанного алгоритма сопряжения упругих тел. Исследуется надежность работы алгоритма и непрерывность получаемого решения при наличии зазоров/нахлестов между контактирующими телами. Приведены результаты решения промышленной задачи об определении спектра резонансных частот составной конструкции детали микроспутника. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-38-70001.

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТО-УПРУГОГО СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

**В.А. Вестяк, В.А. Щербаков**
*Московский авиационный институт, Москва*
v.a.vestyak@mail.ru, wasik87@list.ru

Рассматриваются осесимметричные нестационарные электромагнитоупругие волны в сплошном цилиндрическом теле бесконечной длины. Процесс взаимодействия между механическим и электромагнитным полями описывается уравнениями движения Ламе, уравнениями Максвелла, законом Ома и силой Лоренца. Все искомые функции раскладываются в экспоненциальные ряды Фурье, а затем, к ним применяются преобразования Лапласа по времени. В последующем, изображения искомых функций раскладываются в степенной ряд по малому параметру. Получены явные формулы для изображений коэффициентов разложений искомых функций. Для перехода в пространство оригиналов используется теория вычетов.

## ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ВДАВЛИВАНИИ ШТАМПА В УПРУГУЮ ПОЛУПЛОСКОСТЬ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМ ПОКРЫТИЕМ С УЧЕТОМ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

**С.С. Волков, А.С. Васильев, С.М. Айзикович**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

fenix_rsu@mail.ru

Изучается плоская контактная задача о вдавливании индентора параболической формы в упругую полуплоскость с неоднородным по глубине покрытием. На поверхности покрытия в некоторой области, необязательно совпадающей с областью контакта, задано распределение касательных напряжений, которое считается известным изадается рядом Фурье.Поставленная задача сводится к решению двух системпарных интегральных уравнений. Для решения этих систем использован двухсторонний асимптотический метод. С его помощью получено приближенное аналитическоевыражение для контактных напряжений, асимптотически точное для малых и больших значений геометрического параметра задачи, описывающего относительную толщину покрытия.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства образования и науки РФ № 9.4761.2017/6.7, 9.1481.2017/4.6 и гранта РФФИ 18-07-01177-а. Волков С.С. поддержан Стипендией Президента РФ №СП-3615.2018.1.

## ОДНОМЕРНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОЙ ДИФФУЗИИ

**Л.В. Волкова[1], С.А. Давыдов[1], А.В. Земсков[1,2]**

[1]*Московский авиационный институт*

*(национальный исследовательский университет), Москва*

[2]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

xenon_93@inbox.ru

Рассматривается одномерная нестационарная задача о распространении связанных термоупругодиффузионных возмущений в многокомпонентных изотропных слоях и полупространстве вследствие воздействия поверхностных и объёмных возмущений. Представлена постановка задачи и алгоритм её численно-аналитического решения, полученного в виде свёрток функций Грина и правых частей граничных условий. Проведён анализ особенностей полученных решений. Также рассмотрены некоторые вопросы о приложениях данных задач.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00437.

## МОДЕЛИРОВАНИЕКОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ГЕОМЕТРИИ

**К.В. Гаврилов[1], Ю.В. Рождественский [1], Ю.А. Горицкий[2]**

[1]*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

[2]*Московский энергетический институт, Москва*

gavrilovkv@susu.ru

В статье показывается, что изменение нерегулярной геометрии (шероховатости) поверхностей в ходе их контактного взаимодействия можно анализировать с помощью теории марковских процессов. Идея сведения к марковской модели показывается на простой дискретной схеме, после чего она обобщается. Подход применяется к анализу процесса трения, к режиму усталостного разрушения с учетом смазки, возникающего в результате многократного контакта выступов. Приводится расчетный пример эволюции поверхностей, разделенных слоем смазки для гидродинамического трибосопряжения «коленчатый вал-коренной вкладыш» дизеля.

Работа выполнена при поддержке грантаМинистерства образования и науки РФ№ 9.7881.2017/8.9.

## ВАРИАНТЫ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ ОБЛАСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНТАКТА ДВУХ УПРУГИХ ТЕЛ

**М.П. Галанин[1,2], А.С. Родин[1,2]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

rals@bk.ru

Работа посвящена сравнению вариантов метода декомпозиции области на примере решения нескольких двумерных задач взаимодействия двух упругих тел с криволинейной поверхностью контакта. Суть методасостоит в чередовании кинематических условий (условий Дирихле) и силовых условий (условий Неймана), задаваемых на контактных поверхностях тел. Итерационный процесс выполняется до достижения сходимости, когда и кинематические и силовые условия на контакте выполнены с заданной точностью. Выполнено исследование сходимости итерационного процесса в зависимости от значений итерационного параметра.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-01-00252 и № 18-31-20020.

## МЕХАНИКА ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

**И.Г.Горячева**

*Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*

goryache@ipmnet.ru

Излагаютсяформулировки и методы решения ряда контактных задач теории упругости и вязкоупругости с учетом макро- и микрогеометрии взаимодействующих тел.Изучается влияние микрорельефа поверхности на характеристики контактного взаимодействия в условиях сближения деформируемых тел, а также в условиях их фрикционного взаимодействия. Анализируются зависимости

распределения номинальных и фактических контактных давлений, размера фактической области контакта, величины силы трения, скорости накопления контактно-усталостных повреждений в подповерхностных слоях от параметров микрорельефа поверхностей. Обсуждаются вопросы управления контактными и фрикционными характеристиками взаимодействующих тел за счет выбора оптимальных параметров рельефаих поверхностей.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00574.

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

**М.Ю. Жигалова, Э.В. Галиева, В.А. Валитов, А.Х. Ахунова**
*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
marya.zhig@yandex.ru

Методами конечно-элементного моделирования исследован процесс сварки давлением, при которой обеспечивается максимальная сдвиговая деформация образцов из разнородных интерметаллидных и деформируемых жаропрочных сплавов на основе никеля. Исследовано влияние геометрии образцов, имитирующих составные части биметаллической детали газотурбинного двигателя типа диск-вал, на формирование качественного неразъемного соединения в процессе сварки давлением. Показано, что с ростом угла конусности увеличивается протяженность участков с максимальными значениями сдвиговых деформаций, что способствует повышению прочности соединения.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685.

## ФАКТОРИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ СТРУКТУР

**М.В. Зарецкая[1], В.В. Лозовой[2]**
[1]*Кубанский государственный университет, Краснодар*
[2]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*
zarmv@mail.ru

Модели волновых процессов в геофизической среде при возбуждении сейсмических волн внешними или внутренними источниками, оценка напряженности для дальнейшего прогноза сейсмического состояния требуют учета реального внутреннего строения, отличающегося многообразием и разнотипностью. В работе предложен и обоснован математический аппарат, основанный на топологическом подходе, для исследования напряженно-деформированного состояния и волновых полей в материалах сейсмогенерирующих построек. В качестве примера построена блочная структура и выбраны блочные элементы, соответствующие реальному строению вулканической постройки.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00145.

## МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УПРУГОДИФФУЗИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА

**А.В. Земсков[1,2], Д.В. Тарлаковский[2,1]**
[1]*Московский авиационный институт (НИУ), Москва*
[2] *НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
azemskov1975@mail.ru

В работе рассматривается модель нестационарных упругодиффузионных колебаний пластины Кирхгофа. Для постановки задачи используется модель связанной упругой диффузии для однородного ортотропного многокомпонентного материала. Модель нестационарного изгиба для упругодиффузионной пластины Кирхгофа строится с помощью вариационного принципа Гамильтона. Для решения полученной задачи, используется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье по пространственной координате.

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЯ НА РАБОТУ СИЛ ТРЕНИЯ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ ИЗГИБА

**Г.М. Исмаилов[1], А.Е. Тюрин[2], В.Е. Минеев[1]**
[1]*Томский государственный педагогический университет, г.Томск*
[2]*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург*
*gmismailov@rambler.ru*

Рассмотрены вопросы влияния конструкции кабелей на работу сил трения при трибологическом взаимодействии его элементов. Получены формулы для определения сдвигов и работы сил трения элементов кабелей. Сдвиги элементов кабелей определяет характер изнашивания элементов. Показано, что при постоянной силе трения в зоне деформации кабеля, работа сил трения для элементовкабелей со скруткой имеют цикличность. На практике скрученные изделия, как канаты, кабели и др., имеют локальное изнашивание своих элементов. Более точный анализ требует исследования закономерности изменения силы трения. Решение данного вопроса позволить прогнозировать изнашивание элементов и повысить надежность изделий на стадии проектирования.

## КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОСНОВАНИЙ СО СЛОЖНЫМИ СВОЙСТВАМИ И ФОРМАМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**К.Е. Казаков**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

kazakov-ke@yandex.ru

В работе рассматриваются задачи контактного взаимодействия тел с покрытиями и штампов. Изучаются как задачи одиночного контакта, так и множественного, находятся решения, как для осесимметричного случая, так и для плоского. Для построения решения применяется обобщенный проекционный метод А.В. Манжирова, который позволяет строить эффективные решения для случаев, когда свойства покрытий и профили контактирующих тел описываются сложными быстро изменяющимися функциями.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310381-8) и частично поддержана проектом РФФИ № 18-51-05012 Арм_а.

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ УТЕЧЕК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГЛАВНОМ РАЗЪЕМЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000

**В.С. Каширин, А.В. Осинцев**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

vskashirin@gmail.com

Разъемные соединения реактора имеют уплотнительные устройства, обеспечивающие герметичность. Актуальна проблема герметичности первого контура реакторной установки, где находится активная зона и теплоноситель. Нельзя исключать вероятность нарушения герметичности и протечки радиоактивного теплоносителя в окружающую среду, что приведет к радиационному заражению. Нарушение герметичности возникает за счет следующих факторов: наличия шероховатости контактирующих поверхностей, дефектов изготовления, внутреннего давления, силовых и температурных деформаций. Для оценки величины утечек применялся метод расчета утечек сквозь зазор, возникающий при контакте двух шероховатых поверхностей.

## КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА С ТРЕНИЕМ ДЛЯ ТОНКОСТЕННОЙ ВЫСОКОЭЛАСТИЧНОЙ ТРУБКИ

**А.М. Колесников**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

Alexey.M.Kolesnikov@gmail.com

В данной работе рассматривается контактная задача с трением для тонкостенной высокоэластичной трубки и массивного твёрдого тела. Трубка одним концом частично надета на осесимметричное твёрдое тело. В области контакта трение моделируется законом Кулона. Другой конец трубки либо свободен от нагрузки, либо к нему приложена продольная растягивающая сила, либо другой конец трубки закрыт и вне контакта трубка нагружена равномерным давлением. Сформулированы уравнения равновесия для вставки произвольной выпуклой осесимметричной формы. Подробно рассмотрены частные случаи задачи для твёрдого тела цилиндрической, конической и сферической формы.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской федерации № 14.Z50.31.0046.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКИ ТОНКИМСЛОЕМ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИПРИ ВИБРАЦИИ

**Д.В. Кондратов[1], А.В.Калинина[1], Ю.Н.Кондратова[2], А.А. Попова[3]**

[1]*Поволжский институт управления имени П.А. Столыпина – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации,Саратов*

[2]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

[3]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов*

kondratovdv@yandex.ru

Проведено моделирование взаимодействия соосных геометрически нерегулярной и регулярной оболочек, свободно опираемых на концах,через тонкий слой вязкой несжимаемой жидкости при вибрации. Построена математическая модель указанной системы. Найдены амплитудно-частотные характеристики внутренней геометрически регулярной и внешней геометрически нерегулярной оболочек. Показано влияние вязкости и инерции жидкости на амплитудно-частотные характеристики оболочек. Приведены результаты расчетов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-01-00014-а и гранта Президента Российской Федерации МД-756.2018.8.

## СИММЕТРИЧНАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО УДАРНИКА И ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

**Е.А. Коровайцева, Д.В. Тарлаковский**

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

katrell@mail.ru

В докладе представлено решение динамической задачи о контактном взаимодействии абсолютно твердого ударника и вязкоупругой полуплоскости. Движение полуплоскости описывается двумерными уравнениями. Движение ударника предполагается верти-

кальным. Для сверхзвукового этапа контактного взаимодействия решение уравнения движения ударника получено методом Рунге-Кутта. Для дозвукового этапа контактного взаимодействия составлена разностная схема для разрешающей системы уравнений. Решение контактной задачи получено для разных типов поверхностей, ограничивающих ударник.
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект 19-38-70005 мол_а_мос).

## КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ

**А.Н. Любичева**
*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
lyubicheva@mail.ru

В работе рассмотреноконтактное взаимодействие текстурированной поверхности с упругим основанием. Проведен расчет и анализ контактных характеристик. Исследуются зависимостиразмеров областей сцепления и проскальзывания, нормальных и касательных усилий от геометрических параметров текстуры и упругих свойств материала.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00231.

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА НА АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПРУГИХ ТЕЛ

**Ю.Ю. Маховская**
*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*
makhovskaya@mail.ru

Рассмотрено адгезионное взаимодействие осесимметричного штампа с упругим полупространством с учетом поверхностного микрорельефа в виде регулярно расположенных одинаковых выступов, порывающих штамп. Контакт на микроуровне между системой выступов и упругим полупространством считается дискретным. Решение задачи на макроуровне строится с помощью величины эффективной работы адгезии, полученной в результате решения задачи на микроуровне. Показано, в частности, что эффект адгезии на макроуровне выше, если поверхностные выступы на микроуровне плотнее расположены и имеют больший радиус закругления вершин. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 18-58-00014 и 19-01-00231).

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СООТНОШЕНИИ ТВЕРДОСТЕЙ ИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

**М.М. Матлин, В.А. Казанкин, Е.Н. Казанкина, А.И. Мозгунова**
*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*
matlin@vstu.ru

В работе представлены результаты исследований закономерностей упругопластического контакта шероховатых поверхностей деталей при приложении статической или динамической нагрузки. Показано значительное расхождение между величинами, полученными для каждого вида нагружения. Следует отметить, что методика определения сближения при статическом нагружении учитывает соотношение твердостей материалов контактирующих деталей, т.е. явления, протекающие в контакте.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00049 и в рамках конкурса СП-2018 (СП-253.2018.1).

## КАЧЕНИЕ СФЕРЫ ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ СЛОЮ С УЧЁТОМ АДГЕЗИИ В ФОРМЕ ЛЕННАРДА-ДЖОНСА

**А.Р. Мифтахова**
*Московский физико-технический институт (ГУ), Москва*
*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва*
mif-almira@yandex.ru

Получено решение задачи о качении жёсткой сферы по вязкоупругому слою, сцепленному с жёстким основанием с учётом сил адгезионного притяжения. Вязкоупругий слой моделируется телом Кельвина. Молекулярное взаимодействие поверхностей описывается с помощью потенциала Леннарда-Джонса. Область контакта состоит из зон сцепления и проскальзывания, границы которых заранее неизвестны. Получены распределения нормального и касательного напряжений в области взаимодействия поверхностей сферы и слоя для разных времён последействия и релаксации материала слоя, скорости качения сферы и глубины внедрения точек сферы в слой. Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310379-5)при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00441.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ТЕЛ

**М.В. Мурашов**
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*
murashov@bmstu.ru

Дается обоснование детерминированных моделей теплового контакта, основанных на использовании метода конечных элементов. Предложена конечно-элементная модель учитывающая упругопластический контакт двух шероховатых поверхностей с упрочнением и предварительным наклепом поверхности, деформирование микро и атомарной шероховатости, размерный эффект внедрения и термическое расширение.

## МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА СБОРКИ ГИРОБЛОК-ПЛАТФОРМА

**М.В. Мурашов**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

murashov@bmstu.ru

Условия теплового контакта деталей изменяются во времени при прогреве. Могут возникнуть случаи нестабильности теплового контакта даже при неизменных граничных условиях. Обусловлено это совокупностью взаимозависимости полей температур и деформаций ввиду термического расширения, формы деталей и условий их соединения в сборке. В данной работе на примере модельной задачи теплового контакта сборки гироблок-платформа исследуется качественное и количественное изменение тепловой контактной проводимости от времени. Получено существенное качественное отличие тепловой контактной проводимости от ее стационарного значения.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ШТАМПА И УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ ПРИ УЧЕТЕ СИЛЫ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

**А.С. Оконечников[1], А.Г. Козел[2]**

[1]*Московский авиационный институт, Москва*

[2]*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

oas.mai@mail.ru

Рассматривается нестационарная задача о взаимодействии жесткого выпуклого штампа с изотропной упругой полуплоскостью. Между поверхностями штампа и упругой полуплоскости возникает сила адгезионного взаимодействия еще до вступления тел в механический контакт. В силу учета адгезионной силы, процесс разделен на два этапа: 1) Взаимодействие тел без контакта и 2) этап контактного взаимодействия. В работе исследован первый этап взаимодействия:изучено деформирование упругой полуплоскости под действием адгезии, изучен процесс расширения носителя силы адгезионного притяжения. Представлены графические результаты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-58-04016 и гранта БРФФИ № Т19РМ-089

## ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ С ТРЕНИЕМ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ МЕТОД СИЛ

**А.А. Ольшевский[1], А.А. Ольшевский[2]**

[1]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

[2]*Брянский государственный технический университет, Брянск*

alexander.olshevsky@umlab.ru

Встатье рассмотрен алгоритм решения контактных задач с использованием метода конечных элементов (МКЭ), основанный на методе сил, в котором формирование матрицы коэффициентов требует значительных вычислительных затрат, а система уравнений решается быстро. Эта особенность метода делает алгоритмы на его основе эффективными в задачах с многовариантными расчетами, когда матрица влияния не меняется (например, при моделировании износа). Алгоритм успешно применен в расчете поглощающего аппарата ПМКП-110для выявления зависимости упругих деформаций корпуса при прямом и обратном ходе аппарата от величины хода, которая легла в основу улучшенной динамической модели поглощающего аппарата.

## РЕШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ DSMFEM

**А.А. Ольшевский[1], А.А. Ольшевский[2]**

[1]*ООО "Вычислительная механика", Брянск*

[2]*Брянский государственный технический университет, Брянск*

mailbox@dsmfem.com

Встатье рассмотрен подход к решению контактных задач с трением для деформируемых тел произвольной формы в объемной и плоской постановках, используемый в универсальном программном комплексе конечноэлементного анализа DSMFEM. Дано краткое описание контактного алгоритма, приведены примеры моделирования контакта.

## МОДЕЛЬ БЕРНУЛЛИ–ЭЙЛЕРА В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ БАЛОК

**М.А. Осипенко**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

osipenko.michael@yandex.ru

Рассмотрена классическая модель Бернулли – Эйлера изгиба балки, с успехом применяемая в контактных задачах для балок. Эта модель позволяет найти контактную нагрузку в системе двух и большего числа балок, возможно переменной толщины и возможно имеющих естественную кривизну. Также может быть изучен контакт балки и абсолютно твердого тела. Несмотря на строгие математические постановки соответствующих контактных задач и полученные аналитические решения, модель Бернулли – Эйлера в контактных задачах нередко считается «ошибочной» и «некорректной». Такое представление, подвергнутое надлежащему методологическому анализу и обсуждению, оказывается несостоятельным и должно быть отброшено

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ «ИСКУССТВЕННЫЙ ВОДОЕМ – ГРУНТОВОЕ ОСНОВАНИЕ» В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**А.В. Павлова[1], С.Е. Рубцов[1], И.С. Телятников[2]**

[1]*Кубанский государственный университет, Краснодар*

[2]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

ilux_t@list.ru

Исследована задача о вибрации ограниченного объема идеальной сжимаемой жидкости на упругом слое с защемленной нижней гранью, поверхность которого подвергается локализованной гармонической нагрузке, в плоской постановке. В предположении установившегося характера колебания системы с помощью интегрального подхода задача сведена к интегральному уравнению относительно комплексной амплитуды гидродинамического давления в области контакта резервуара и основания, решаемому методом факторизации. Рассчитаныконтактные напряжения, построены соотношения для потенциала скоростей в жидкости и перемещений основания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-01-00124.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ СТАЛЬ-КОМПОЗИТ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Д.Д. Палкин[1], А.А. Чекалкин[1]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

13denis01@mail.ru, a.a.chekalkin@yandex.ru

В работе проводится численное моделирование контактного взаимодействия однонаправленных волокнистых полимерных композиционных материалов в конечно–элементном пакете ANSYS и исследуются коэффициенты трения для ячеек с износом 0%, 25%, 50% и 75%. Для прогнозирования коэффициент трения композитов было предложено использовать метод механики композиционных материалов – метод локального приближения. С помощью численного моделирования были получены поля распределения нормальных напряжений и контактных напряжений в зоне контакта и сделаны соответствующие выводы.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА И СТРУКТУРЫ

**С.В. Панин [1,4], Б.А. Люкшин [1,2,3], С.А. Бочкарева [1,2], Н.Ю. Гришаева [1,2], П.А. Люкшин [1], В.О. Алексенко [1], И.Л. Артемов [2]**

[1] *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,*

[2] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск*

[3] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

[4] *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

svp@ispms.tsc.ru

Работа посвящена моделированию износостойкой композиции, наполненной углеволокном на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.Проводится оценка влияния длины углеволокон на механические и триботехнические свойства композиции на основе численного моделирования.Чтобы прогнозировать влияние структуры на изменение эффективных свойств и в целом их влияние на износостойкость композиции, численно моделируется расчет эффективных свойств композиции, а затем моделируется процесс трения с учетом полученных свойств. Проводится сравнение с экспериментальными данными. Учитывается влияние температуры на изменение свойств композиции в процессе трения. Оценивается влияние длины углеволокон на износостойкость наполненных композиций на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы по направлению фундаментальных исследований III. 23., а также при поддержке проекта РФФИ № 14-08-90028 Бел_а.

## ВЛИЯНИЕ ОДИНОЧНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРОФИЛИРОВАННОГО РОЛИКА

**М.Я. Пановко**

*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва*

mpanovko@yandex.ru

Формулируется и решается численно упругогидродинамическая задача о контакте смазанного профилированного ролика с учётом одиночных неровностей (бугорок, лунка) на его поверхности. Математическая модель задачи сводится к системе нелинейных интегродифференциальных уравнений и неравенств с граничными условиями. Численное решение задачи осуществлялось на основе метода Ньютона. Показано заметное влияние расположения и типа неровности на распределения давления и толщины смазочной плёнки в зоне контакта.

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕУПОРНОЙ ОСНАСТКИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АЛЮМОТЕРМИТНЫМ РАСПЛАВОМ

**А.В. Попов, О.Н. Комаров, В.В. Предеин**

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*

popov.av@protonmail.com

Обеспечение машиностроения дешёвой, качественной, конкурентоспособной продукцией является основной целью заготовительного производства. Эта задача решается применением технологий, позволяющих снизить себестоимость получаемого изделия, примером таких технологий является алюмотермия. Алюмотермия позволяет получать литые металлоизделия и обладает множеством конкурентных преимуществ над традиционным литьём. В работе рассматриваются факторы, влияющие на взаимодействие продуктов экзотермической реакции и огнеупорных материалов, пути снижения воздействия высоких температур на огнеупоры и повышения стойкости тиглей и форм.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИБРИРУЮЩЕГО ШТАМПА С ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНОЙ, ИМЕЮЩЕЙ СЖИМАЕМЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ, ЧЕРЕЗ СЛОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**В.С. Попов[1], Л.И. Могилевич[1], А.В. Черненко[1], Е.В. Попова [2]**

[1]*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов*

[2]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

vic_p@bk.ru

Исследовано взаимодействие трехслойной пластины с вибрирующим штампом через слой вязкой несжимаемой жидкости. Несущие слои пластины удовлетворяют гипотезам Кирхгофа, учитывается обжатие жесткого заполнителя. Деформации малые, на границах слоев перемещения непрерывны. Движение жидкости между пластиной и штампом ползущее. На границах контакта с жидкостью выполняются условия прилипания. Определены гидродинамические параметры в жидкости, перемещения слоев пластины. Построены частотозависимые функции распределения амплитуд перемещений слоев пластины и давления жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01- 00127а и гранта Президента РФ МД-756.2018.8.

## КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ

**Д.А. Пожарский[1], Н.Б. Золотов[2]**

[1]*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

[2]*Южныйфедеральный университет, Ростов-на-Дону*

pozharda@rambler.ru

Рассматриваются контактные задачи для неоднородных упругих полых цилиндров бесконечной длины, взаимодействующих с жестким бандажом или вкладышем конечной длины. Материал цилиндра характеризуется переменным коэффициентом Пуассона (переменным модулем Юнга) по радиальной координате. Исследуется контактное взаимодействие жесткой втулки с поверхностью цилиндрической шахты в составном упругом пространстве при скользящей заделке между слоями. Задачи сведены к интегральным уравнениям относительно контактных давлений. Для решения используется сингулярный асимптотический метод, эффективный для относительно длинных участков контакта. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00017.

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ СОСТАВНЫХ ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ

**С.Г. Пшеничнов**

*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

serp56@yandex.ru

Рассматриваются задачи о распространении нестационарных волн в телах, состоящих из линейно-вязкоупругих однородных составляющих. Деформации считаются малыми, и предполагается ограниченность области распространения возмущений. Исследуются вопросы, связанные с построением решений таких задач методом интегрального преобразования Лапласа по времени с последующим обращением. Установлены свойства решений в изображениях, которые упрощают процесс отыскания оригиналов. Это позволило исследовать переходные волновые процессы в различных многослойных конструкциях.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00471, 19-08-00438.

## К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ В ОЦЕНКЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДРЕВЕСНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

**П.Г. Пыриков, А.А. Ольшевский,А.Я. Данилюк**

*Брянский государственный технический университет, Брянск*

pyrikovpg@mail.ru

Рассматриваются аспекты решения контактной задачи в оценке грузоподъемности втулки и вкладышей подшипников скольжения. Изложена последовательность формирования матриц жесткости конечно-элементной модели подшипника, показано влияние анизотропии на напряженно-деформационное состояние. Объекты: материалы, получаемые по технологиям объемного модифицирования древесины с прессованием, а также имплантирования металлической фазы в анатомические структурные составляющие.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по госзаданию «Исследование и создание подшипников скольжения повышенной износостойкости на основе древесно-металлических композиционных материалов» (№ 9.10677.2018/11.12).

## СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

**П.А. Радченко, С.П. Батуев, А.В. Радченко**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

pavel@radchenko.site

В статье представлены результаты применения различных подходов к моделированию разрушения контактных поверхностей при высокоскоростном взаимодействии твердых тел. Выделено три основных метода, которые различаются алгоритмами распределения массы после разрушения элементов на контактных границах. Для расчетов использовался авторский вычислительный комплекс EFES. Моделирование проводилось в полной трехмерной постановке. Произведено сравнение полученных результатовмежду различными алгоритмами и экспериментом.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-41-703003, №18-48-700035.

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УПРУГИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ. ТЕОРИЯ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

**М.Ю. Рязанцева**

*НИИ механики МГУ,Москва*

m-rznt@yandex.ru

Обсуждаются особенности моделирования динамических процессов при нестационарном нагружении трёхслойных упругих композитов. Показано, что при сильно различающихся механических характеристиках материалов слоёв существенно проявляются такие эффекты, как поперечный сдвиг и поперечное обжатие, а также геометрическая дисперсия волн. Предлагается исследовать динамику таких композитов на основе двумерных динамических моделей, учитывающих высокочастотные формы колебаний. Даны примеры применения построенных моделей.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-58-00008, 19-08-00968.

## ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОЛЁСАХ ВАГОНОВ

**В.И. Сакало, А.В. Сакало**

*Брянский государственный технический университет, Брянск*

sakalo@umlab.ru

Выполнен анализ критериев, применяемых в области железнодорожного транспорта для расчёта контактно-усталостнойпрочности колёс подвижного состава и рельсов. С использованием метода конечных элементов рассмотренные критерии протестированы на задаче Герца с полным скольжением. С помощью обработки результатов испытаний на контактную усталость для рассмотренных критериев построены кривые контактной усталости колёсных сталей с различной твёрдостью. Алгоритм моделирования процесса накопления контактно-усталостных повреждений в колёсах реализован в модулеUM RCF, входящем в состав программного комплекса «Универсальный механизм».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00815А.

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НАЛИПАНИЯ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ НА ИНСТРУМЕНТ

**М.А. Сережкин**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

serezhkin@bmstu.ru

В статье представлена методика проектирования технологического процесса вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1. Расчёт технологических параметров процесса вытяжки в представленной методике происходит на основании научно обоснованных теоретических зависимостей, при выполнении которых устраняется налипание заготовки на инструмент, что эффективно при штамповке сферических элементов плавучего понтона из материала АД1, используемых при хранении и транспортировки лёгких углеводородов.

## ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ AL-MG СПЛАВА ВБЛИЗИ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОТАЛКИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ЧЕРЕЗ КОНИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

**Е.О. Смирнова, А.С. Смирнов**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

evgeniya@imach.uran.ru

Посредством кинетического индентирования проведена апробация методики определения толщины деформированного слоя, полученного при контакте с шероховатым деформирующим инструментом. Исследования проводили на алюминиевом сплаве АМг6 после проталкивания через коническую матрицу с полууглом конусности 1,5°.Анализ экспериментальных данных показал существование деформированного слоя вблизи поверхности контакта равным 200 мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00736 в части отработки методики определения деформированного слоя и в рамках научно-исследовательской работы Института машиноведения УрО РАН (проект № 0391-2016-0001) в части определения свойств сплава АМг6.

## КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ПРИ ОБЪЕМНОМ ПРИЛОЖЕНИИ СИЛ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: НЕОДНОРОДНОЕ ОСНОВАНИЕ, ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

**И.А. Солдатенков**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

iasoldat@hotmail.com

Рассматривается уточненная постановка контактной задачи при наличии объемно приложенных сил межмолекулярного взаимодействия контактирующих тел. Описывается метод построения функции влияния (Грина) для упругого основания, состоящего из полупространства и сцепленного с ним слоя. Продемонстрированы некоторые зависимости функции влияния от параметров контакта. Для однородного полупространства проводится анализ подповерхностных напряжений, связанных с разрушением материала. Установлено существенное различие напряженных состояний в тонком подповерхностном слое при уточненной и классической постановках задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-58-00014.

## ДВИЖЕНИЕ ЗОНДА В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ МОДУЛЕ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

**М.Ю. Сотский, В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

msotsky.bmstu@mail.ru

Разработана технология лабораторного наблюдения и высокоскоростной оптической регистрации процессов ускорения измерительных зондов, их движения во время сближения с исследуемой реологической средой и дальнейшего движения в ней.Проведена серия опытов и установлены особенности процесса ускорения зонда в баллистическом модуле при детонации водородно-кислородной смеси.Представлены результаты анализа видеорегистраций процессов ускорения для различных вариантов исполнения измерительных зондов в заданном диапазоне изменения начальных условий опытов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00701 А) и с использованием оборудования ГЗ 3.6196.2017/7.8 и ГЗ 3.6257.2017/7.8.

## СКОЛЬЖЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНДЕНТОРОВ ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ ПОЛУПРОСТРАНСТВУ

**Ф.И. Степанов**

*Институт проблем механики РАН, Москва*

stepanov_ipm@mail.ru

Рассматривается пространственная контактная задача о скольжении системы, состоящей из конечного числа инденторов по вязкоупругому полупространству с постоянной скоростью. Материал полупространства описывается в виде зависимости деформаций от напряжений, определяемой с помощью интегрального оператора Вольтерра и эксоненциального ядра ползучести. Полученный анализ численного решения показал, что взаимное влияние инденторов, а также вязкоупругие свойства материала полупространства являются причиной анизотропии деформационной составляющей силы сопротивления скольжению. В работе представлен анализ сил и моментов сил, действующих на систему инденторов в зависимости от их взаимного расположения, скорости скольжения и других параметров задачи.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310379-5)

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ С ПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК И АБСОЛЮТНО ТВЕРДЫХ ИЛИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

**Д.В. Тарлаковский[1,2], Г.В. Федотенков[1,2]**

[1]*НИИмеханики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Московский авиационный институт (национальный технический университет), Москва*

greghome@mail.ru

Рассматриваются нестационарные контактные задачи для тонких упругих оболочек типа Тимошенко и абсолютно твёрдых или деформируемых тел. Метод решения основан на принципе суперпозиции, использование которого сводит общую постановку контактных задач к системам интегро-функциональных уравнений. Основные уравнения вытекают из граничных условий и интегральных связей перемещений в зоне контакта с контактными напряжениями. При этом ядрами соответствующих интегральных операторов являются нестационарные поверхностные функции влияния взаимодействующих тел. Для построения решений разработаны оригинальные численно-аналитические алгоритмы, основанные на методе механических квадратур.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00438 А.

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ДЛЯ УПРУГОГО МОМЕНТНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

**Д.В. Тарлаковский [1,2], Чан Ле Тхай[2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

tdvhome@mail.ru

Рассматривается осесимметричная задача о построении нестационарных поверхностных функций влияния для полупространства, заполненного средой Коссера. Для построения их явного вида используются интегральные преобразования Лапласа и Ханкеля. Оригиналы строятся с использованием метода малого параметра, в качестве которого принимается коэффициент связи полей перемещения и поворота. Обращение преобразований для части функций влияния проводится последовательно, а остальных функций используется связь плоской и осесимметричной задач. Проанализировано влияние учета моментных свойств среды. Приводятся примеры расчетов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00471.

## КОНТАКТ ДВИЖУЩИХСЯ УПРУГИХ ТЕЛ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СО СЛОЕМ СЖИМАЕМОЙ И НЕСЖИМАЕМОЙ СМАЗКИ

**М.Ю. Темис**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

Mikhail.temis@gmail.com

Представлена математическая модель контакта движущихся упругих тел, разделенных слоем смазки, позволяющая определять их напряженно-деформированное состояние и параметры течения в зазоре между ними для случаев сжимаемой и несжимаемой смазки. Решение задачи рассмотрено на примере радиальных и осевых подшипников скольжения, применяемых в опорах роторов. Математическая модель включает в себя совместное решение задачи определения параметров течения смазки в зазоре, чья геометрия определяется деформациями ивзаимными перемещениями деталей ротора и подшипника, и задачи расчета деформаций деталей ротора и подшипника под действием давления смазки.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ТЕЛ С ПОКРЫТИЯМИ ПРИ НАЛИЧИИ АДГЕЗИИ

**Е.В. Торская, Ф.И. Степанов**

*Институт проблем механики им.А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

torskaya@mail.ru

Предложен численно-аналитический метод расчета контактных давлений и внутренних напряжений, возникающих в покрытии и подложке при вдавливании гладкого индентора произвольной формы с учетом сил адгезии. Проведен анализ влияния толщины покрытия и наличия адгезионного притяжения на внедрение индентора в широком диапазоне нагрузок, а также на напряженно-деформированное состояние покрытия и подложки. Результаты моделирования могут быть использованы для решения обратной задачи – определения модуля упругости покрытия по результатам индентирования с учетом адгезии и деформации подложки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00574

## О КОНТАКТЕ ПАРЫ ЗУБОВ ЧЕРЕЗ ИНДИВИДУАЛЬНО АДАПТИРУЕМУЮ ОДНОСЛОЙНУЮ КАППУ

**Т.Н.Устюгова, А.А.Каменских**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

anna_kamenskih@mail.ru

Рассмотрено численное моделирование контактного деформирования пары зубов через индивидуально адаптируемую однослойную каппу для одного клинического случая. В рамках численного исследования выполнен анализ влияния использования зубной шины на характер деформирования элементов зубочелюстной системы и параметры контакта в зонах смыкания зубов. Получены поля распределения интенсивности напряжения в твердых тканях зубов, на основе которых выполнен анализ зависимости $\max\sigma_и$ от силы индентирования.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края и РФФИ (проект № 17-48-590411 р_а).

## СИММЕТРИЧНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОНТАКТА ТРЕНИЯ

**С.В. Федоров**

*Калининградский государственный технический университет, Калининград*

fedorov@klgtu.ru

Интенсивная пластическая деформация контактных объемов при трении, как основной механизм трансформации энергии, характеризуется синергетическим эффектом кооперативного поведения структурных элементов, вследствие протекания самоорганизации и приспособления контактных объемов (элементарных трибосистем). При трении идеальная эволюция контактного объема трения имеет симметричный вид. Процесс начинается и заканчивается в областях упругого поведения. Между ними существует пластический максимум - сильно-возбуждённое состояние. Итогом идеальной эволюции элементарной трибосистемы является образование уникальной наноструктуры, основу которой представляет механический (нано) квант.

## ОСОПРЯЖЕНИИ ТОНКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В УПРУГИХ ТЕЛАХ

**А.М. Хлуднев**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,*
*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

khlud@hydro.nsc.ru

Обсуждаются проблемы сопряжения тонких включений различной природы, расположенных в упругих телах. Включения могут отслаиваться, образуя тем самым трещину между упругим телом и включением. На берегах трещины задаются нелинейные краевые условия вида неравенств, исключающие взаимное проникание противоположных берегов. Найдены краевые условия в точке сопряжения для широкого класса тонких включений.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ДВУХВАЛКОВЫХ МОДУЛЯХ

**Ш.Р.Хуррамов, Г.А.Бахадиров, Ф.С.Халтураев, Ф.З.Курбанова**

*Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН Республики Узбекистан, Ташкент*

shavkat-xurramov59@mail.ru

Работа посвящена моделированию контактного взаимодействия в двухвалковых модулях. Рассмотрен двухвалковый модуль, в котором валки расположены относительно вертикали наклоном справа, диаметры валков неодинаковы, валки имеют эластичные покрытия с различными жесткостями, слой материала подан наклоном вниз. Определены контактные углы в двухвалковом модуле в случаях, когда оба валка приводные и когда верхний валок свободный. Выражения углов контакта уточнены с учетом условие захвата в двухвалковом модуле. Найдены зависимости, описывающие формы кривых контакта валков в рассматриваемом двухвалковом модуле. Анализированы частные виды полученных зависимостей.

## УПРУГИЙ КОНТАКТ ИНДЕНТОРА С ВОЛНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАДАЧ

**И.Ю. Цуканов**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

Рассмотрена постановка и способ аналитического решения задачи об упругом нормальном контакте гладкого (цилиндрического и сферического) индентора с волнистой поверхностью в условиях малости амплитуд волн в плоском и пространственном случаях. Получены зависимости полной нормальной нагрузки от размера области контакта. Выявлен осциллирующий характер данных зависимостей, существенно зависящий от размерности задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-58-00014 Бел_а (постановка контактных задач, анализ результатов) и проект № 17-01-00352 А (разработка метода решения задач)).

## ИНДЕНТИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ ОСНОВАНИЙ

**А.А. Яковенко**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва*

anastasiya.yakovenko@phystech.edu

При проектировании медицинского оборудования важным этапом является тактильное очувствление рабочего элемента. Эта задача требует разработки механических моделей контактного взаимодействия медицинских инструментов с мягкими тканями. В работе рассматривается внедрение с постоянной скоростью жесткого индентора в слоистое основание. При этом исследуется влияние скорости взаимодействия инструмента с тканью и механических характеристик основания на распределение контактных напряжений и прикладываемую нагрузку. Используемые модели основания позволяют учитывать такие свойства мягких биологических тканей, как вязкоупругость и неоднородность.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-58-52004.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НЕКОНФОРМНЫХ СЕТКАХ

**А.В.Вершинин [1], Д.А.Коновалов [2], А.В.Кукушкин [2], В.Ан.Левин [1]**

[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
[2]*ООО ”Фидесис”, Москва*

versh1984@mail.ru

В докладе рассматривается подход к численному моделированию упругого взаимодействия между деформируемыми твердыми телами в составе единой конструкции. Предполагается, что тела взаимодействуют друг с другом в процессе деформирования без проскальзывания и разъединения по общим внутренним границам (тела склеены друг с другом). Приводятся примеры задач для верификации разработанного алгоритма сопряжения упругих тел. Исследуется надежность работы алгоритма и непрерывность получаемого решения при наличии зазоров/нахлестов между контактирующими телами. Приведены результаты решения промышленной задачи об определении спектра резонансных частот составной конструкции детали микроспутника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-38-70001.

## Подсекция III-6. МЕХАНИКА НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД. КОМПОЗИТЫ, МОМЕНТНЫЕ, ГРАДИЕНТНЫЕ, МИКРОПОЛЯРНЫЕ СРЕДЫ, МЕХАНОХИМИЯ

### К ТЕОРИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ, ПО-РАЗНОМУ СОПРОТИВЛЯЮЩИХСЯ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ

**Б.Д. Аннин[1], В.М. Садовский[2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

sadov@icm.krasn.ru

Развивается феноменологический подход к построению определяющих уравнений волокнистых композитов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию. Модули упругости при растяжении вычисляются по формулам осреднения или определяются экспериментально. Модули упругости при сжатии вычисляются на основе решения обратных коэффициентных задач по данным измерения прогибов тонких стержней. Сшивка уравнений для растяжения и сжатия осуществляется с помощью обобщенного реологического метода, в котором наряду с традиционными элементами (упругой пружиной, вязким демпфером и пластическим шарниром) используется новый реологический элемент – жесткий контакт, имитирующий поведение гибкой нерастяжимой нити.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00511.

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

**Х.Ж. Байшагиров[1], Т.Д. Каримбаев[2], С.К. Ермаганбетова[3]**

[1]*КГУ им. Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан,*

[2]*ЦИАМ им. П.И.Баранова, Москва, Россия,*

[3]*КГУ им. Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан*

bayshagir@mail.ru

На основе вариационного принципа для двухкомпонентной среды решается задача о свободных колебаниях стержня из композиционного материала (КМ). Модельное увеличение степеней свободы движения частиц неоднородной среды позволяет каждому компоненту проявлять свои инерционные свойства. Это приводит к выявлению «раздвоения частот», т.е. к описанию движения по каждой форме колебаний при двух разных частотах. Это явление исследовано анализом биквадратного уравнения и подтверждено результатами различных испытаний свободных колебаний лопаток из КМ при разных величинах параметров взаимодействия компонентов.

Работа выполнена при поддержке гранта Комитета Науки МОН РК №AP05135906.

### НИЗКОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

**О.В. Бочарова[1], И.Е. Анджикович[2], А.В. Седов[1], В.В. Калинчук[1,2]**

[1]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону,*

[2]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

olga.v.bocharova@gmail.com

Предложен низкочастотный метод мониторинга, основанный на анализе параметров поверхностного волнового поля. Для обработки регистрируемого сигнала применен биспектральный подход, основанный на использовании оптимальных ортогональных разложений сигналов по базису, адаптивно настраиваемому по обучающей выборке. Проведена серия экспериментов для исследования возможности использования этого метода для идентификации неоднородностей (полостей, включений). Исследована чувствительность метода к плотности материала включения:

Работа выполнена в рамках реализации госзадания Южного научного центра РАН, проект 01201354242 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-38-00871-мол_а.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕОДНОРОДНОМ ПО ГЛУБИНЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ТЕПЛОВОМ УДАРЕ

**В.Б. Беднова[1], В.И. Горбачев[1]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

bednovavb@abc.math.msu.su

Рассматривается задача теплопроводности для неоднородного по глубине полупространства при внезапном нагреве его границы. Решение задачи получено с помощью интегральных формул, позволяющих выразить температуру в исходной задаче через температуру в сопутствующей задаче (такая же задача для однородного полупространства). В качестве сопутствующей рассматривается задача о тепловом ударе на поверхности однородного полупространства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 14.577.21.0271, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0271).

## ВАРИАЦИОННАЯ 4D-ПОСТАНОВКА СВЯЗАННОЙ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

**П.А. Белов**

*Институт Прикладной Механики РАН, Москва*

BelovPA@yandex.ru

Вариационная 4D-формулировка моделей течения вязких жидкостей приводит к вариационному уравнению Седова. Структура вариационного уравнения Седова определена вариацией лагранжиана обратимых процессов и суммой линейных вариационных неинтегрируемых форм, названных "каналами диссипации". Неинтегрируемые вариационные формы, определяющие возможные каналы диссипации, записаны относительно тех же кинематических переменных, что и лагранжиан, т.е. список кинематических переменных лагранжиана и каналов диссипации является согласованным.

Работа выполнена при поддержке гранта **РФФИ** 18-01-00553**а.**

## НЕЛОКАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И КОНЦЕПЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕХАНИКЕ НЕСИНГУЛЯРНЫХ ТРЕЩИН

**В.В. Васильев[1], С.А. Лурье[2]**

[1]*Институт проблем механики РАН, Москва*

[2]*Институт прикладной механики РАН, Москва*

salurie@mail.ru

Рассматриваются нелокальные теории упругости, учитывающие масштабные эффекты. Обсуждаются модели градиентных теорий, особенности краевых задач, условия корректности. Рассматривается вариант обобщенной теории, где решение краевой задачи расщепляется в случае статических краевых условий на последовательность решения классической упругости и краевой задачи для уравнения Гельмгольца. Показывается, что обобщенное решение сингулярной задачи механики трещин сводится к несингулярной проблеме концентрации напряжений. Предлагается новая концепция несингулярной механики трещин, где масштабный параметр наряду с предельными напряжениями определяет критерий разрушения и находится из экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-01-00355.

## ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО КАУЧУКА ПРИРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

**Х.Х. Валиев, Ю.В. Корнев, П.Е. Семенов, Ю.Н. Карнет, О.Б. Юмашев**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

hhvlv@mail.ru

С помощью электронной и атомно – силовой микроскопии изучены структуры поверхности композитов бутадиен–стирольного каучука с различными минеральными наполнителями: шунгитовыми, тауритовыми, диатомитовыми, галлуазитовыми и неосиловыми. Проведена корреляция полученных данных с результатами исследования физико – механических свойств этих материалов.

Работа выполнена по теме государственного задания в ИПРИМ РАН на период 2019-2021 гг. Номер гос.регистрации**:** АААА-А19-119012290177-0**.**

## ВЛИЯНИЯ ГРАНИЦЫ СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛА 08Х18Н10Т-СТАЛЬ 10, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

**И.А. Веретенникова, С.В. Смирнов, Д.И. Вичужанин, Д.А. Коновалов**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

irincha@imach.uran.ru

В работе проведена оценка изменения условного предела текучести биметаллической полосы 08Х18Н10Т-сталь 10 в целом, отдельных ее компонентов и сварной области при поэтапной пластической деформации. Полученные данные способствуют пониманию вклада отдельных компонентов в многослойном материале в характер деформации всего пакета при пластической деформации.

Работа выполнена в соответствии с комплексной программой УрО РАН “Арктика”, проект № 18-9-1-20.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МИКРОПОЛЯРНЫХ СРЕДАХ

**Е.Н. Вильчевская**

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

vilchevska@gmail.com

Рассматривается микрополярная среда со структурными превращениями. Показано, что при описании процессов, связанных с консолидацией или дефрагментацией частиц, стандартные балансовые соотношения для массы, количества движения и момента количества движения должны быть дополнены балансовым соотношением для тензора инерции с источниковым членом, отвечающим за структурные изменения среды. Необходимость формулировки новых балансовых соотношений, и в частности, интерпретация входящих в них источниковых членов, демонстрируется исходя из рассмотрения репрезентативного объема на мезоуровне с учетом микроструктуры полярной среды.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТВЕРЖДЕНИИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.Д. Власенко, К.А. Чехонин**

*Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск*

lex7861@rambler.ru

Построены феноменологические определяющие соотношения для высоконаполненных полидисперсным наполнителем полимерных материалов в условиях отверждения с учетом особенностей релаксационных переходов при гелировании и стекловании. Проведены многопараметрические численные и экспериментальные исследования процесса отверждения композита в пресс-фомах. Показано влияние режимов отверждения, механических свойств наполнителя, связующего и пресс-формы на эволюцию напряжений в отверждаемом изделии.

## СТРУКТУРА РЕШЕНИЙ ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ЭШЕЛБИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАУССА ДЛЯ ОДНОРОДНЫХ ПОЛИНОМОВ

**Д.Б. Волков-Богородский**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

volkov-bogorodskij@iam.ras.ru

Исследуется структура решений обобщенной задачи Эшелби в теории упругости для многослойных включений сферической и цилиндрической формы с полиномиальным полем перемещений на бесконечности. Такая задача возникает в методе асимптотического усреднения уравнений вязкоупругости с быстроосциллирующими коэффициентами и используется для точного вычисления эффективных характеристик композитного материала. Для ее решения привлекается представление Гаусса для однородных полиномов, которое позволяет указать такие потенциалы представления Папковича-Нейбера в фазах материала, которые разрешают задачу Эшелби в конечном алгебраическом виде.

Работа выполнена при поддержке ФЦП № 2017-14-576-0053-162.

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ В МЕХАНИКЕ КОМПОЗИТОВ И В ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

**В.И. Горбачёв[1]**

[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

vigorby@mail.ru

Показано, что решение линейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами, зависящими от координат и времени (исходное уравнение), выражается через решение уравнения того же типа, но с постоянными коэффициентами (сопутствующее уравнение) с помощью интегральной формулы. Установлена связь сопутствующих коэффициентов с коэффициентами исходного уравнения. Даны примеры применения к задачам механики композитов и к приближенному решению некоторых нелинейных уравнений: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.577.21.0271, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0271).

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МИКРОПОЛЯРНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

**Ю.М. Григорьев[1], А.А. Гаврильева[2]**

[1] *Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск,*

[2]*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск*

grigyum@yandex.ru

Для тел конечных размеров точных аналитических решений задач теории упругости, учитывающих микроструктуру материалов (микрополярной), все еще найдено мало. В данной работе новым аналитическим методом удается получить точные решения плоской статической задачи о равновесии моментно-упругого прямоугольника с некоторыми смешанными краевыми условиями; а также, получить точные решения плоской задачи о собственных гармонических колебаниях моментно-упругого прямоугольника при однородных смешанных краевых условиях. Параметрический анализ точных решений позволяет выделить микрополярные эффекты. Примененный метод может быть обобщен на другие задачи микрополярной теории упругости.

## СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЕСТЕСТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ В СИСТЕМЕ AL-NB

**В.Н. Даниленко, Р.Р. Мулюков**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

Тонкие пластины Al и Nb с ультрамелкозернистой структурой укладывали с чередованием слоев Al-Nb-Al затем деформировали путем кручения под высоким квазигидростатическим давлением в наковальне Бриджмена.. Полученные образцы отжигали при температуре 500°C, а затем 550$^{o}$ C в течение 30 мин. С помощью рентгенофазового анализа выявлено образование интерметаллид-

ного соединения $Al_3Nb$, а его доля увеличивается в процессе нагрева. Значение микротвердости при нагреве на 500°С уменьшается и затем резко растет при нагреве на $550^o$ С.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-12-00440.

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

**М.Н. Данилов[1], П.П. Бардаев[2,3]**

[1] *Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск,*

[2] *Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск*

[3] *ООО «Бриз», Новосибирск*

danilov@sibstrin.ru

В работе рассмотрены вопросы математического описания напряженно-деформированного состояния конструкций из структурно-неоднородных материалов. Предложен математический метод определения деформаций на поверхности конструкций из структурно-неоднородных материалов типа бетона. Предложена оригинальная конструкция упругого элемента тензодатчика деформаций (экстензометра) для практической реализации разработанного метода.
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00103.

## СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

**М.Н. Данилов**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск*

danilov@sibstrin.ru

Структурно-феноменологический подход к построению математических моделей неупругого деформирования структурно-неоднородных материалов в настоящее время является наиболее перспективным. Учет в математических моделях структурных изменений в материале позволяет получать модели, которые сохраняют адекватность в широком диапазоне значений параметров и обеспечивают более высокую точность по сравнению с феноменологическими моделями. Предложена структурно-феноменологическая модель деформирования структурно-неоднородного материала типа бетона. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00103.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ОТСУТСТВИИ И НАЛИЧИИ ДЕФЕКТА

**В.В. Дударев, Р.М. Мнухин**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

dudarev_vv@mail.ru

В рамках модели неоднородного упругого тела рассмотрены две задачи о колебаниях цилиндра с функционально-градиентным покрытием при отсутствии и наличии дефекта. Решение первой задачи реализовано численно с помощью метода пристрелки. Проведен подробный анализ влияния толщины и законов изменения материальных свойств покрытия на основные акустические характеристики. В рамках второй задачи считается, что в некоторой области контакта покрытия имеется отслоение. После преобразований численное решение задачи сведено к анализу ядра сформулированного интегрального уравнения в зависимости от параметров отслоения.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00069.

## СПЕКТР ВРЕМЕН РЕЛАКСАЦИИ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ И РЕОЛОГИИ

**Д.С. Дудин[1], И.Э. Келлер[1,2]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

dmitryovj@yandex.ru

Исследуются времена релаксации связанных диффузионных и реологических процессов в металлах в рамках модели, учитывающей упругие и вязкие объемные и сдвиговые модули. Рассматриваются возмущения однородного стационарного решения полевых уравнений с произвольным волновым числом. Получены асимптотические выражения для коэффициентов взаимной диффузии при исчезающе малых и неограниченно больших волновых числах. В первом случае обычная диффузия может сопровождаться быстрой диффузией, если энергия концентрационной дилатации существенно превышает тепловую энергию.
Работа выполнена по теме государственного задания № ГР АААА-А16-116121410009-8 при поддержке гранта РФФИ № 17–08–01085.

## О МОДЕЛИРОВАНИИ УПРУГИХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛЯРНЫХ ОБОЛОЧЕК И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**В.А. Еремеев**

*Политехнический университет Гданьска, Гданьск, Польша,*
*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия*

eremeyev.victor@gmail.com

Для определенного класса сетчатых упругих оболочек и трехмерных упругих решеток, испытывающих конечные деформации, предложены континуальные модели, использующие уравнения состояния микрополярных оболочек и упругих тел. В рамках микрополярной модели кинематика описывается при помощи шести кинематически независимых скалярных степеней свободы – полем перемещений и поворотов. Выведены нелинейные уравнения состояния для поверхностной плотности энергии деформации сетчатой оболочки и для трехмерной решетки. Полученные соотношения являются частным случаем общих определяющих соотношений упругих микрополярных оболочек и тел при конечных деформациях. Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации в рамках программы мегагрантов, проект № 14.Z50.31.0046.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ РАСТЯЖЕНИЯ, ИЗГИБА И УСТОЙЧИВОСТИ ГУСТО ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПЛАСТИН, ОБОЛОЧЕК И ПОРИСТЫХ ТЕЛ

**М.Н. Жестков, В.Г. Баженов**

*Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

mnzhestkov@yandex.ru

Задача упругого деформирования густо перфорированных пластин и оболочек решена путём замены неоднородной конструкции на сплошной материал с эффективными свойствами. Показана область применимости теории пластин и оболочек типа Тимошенко для задач упругого и упругопластического изгиба густо перфорированных конструкций. Оценена область применимости принципа подобия при моделировании процесса статического и динамического сжатия пористого материала и при расчёте устойчивости и изгиба цилиндрических густо перфорированных оболочек в упругопластической постановке.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-10039-П.

## КРОССХЕЛИКАЛЬНЫЕ ТКАНИ КАК ВОЗМОЖНАЯ ОСНОВА НОВОГО КЛАССА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.Ю. Жиркевич, А.В. Березин**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

basiliuss@gmail.com

Представлена ткань, отличающаяся ранее не применявшимся переплетением нитей, которое обладает рядом полезных особенностей и названо авторами кроссхеликальным. Главным отличием такого переплетения является высокая, ранее не достигавшаяся, связность получаемой структуры. Ткани предлагаемого типа могут получаться многослойными и плотными и служить в качестве основы для создания композиционных материалов, имеющих высокую живучесть. Возможны также иные неожиданные применения, типа гибких рукавов из технической керамики. Не смотря на необычность строения, предлагаемая ткань в изготовлении оказывается даже проще, чем материалы, получаемые по традиционным технологиям ткачества.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АДАПТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.С. Жернаков, Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев**

*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа*

paulnightingale@mail.ru

В работе представлены результаты исследований элементов конструкций (лопатки компрессора и др.) из углепластиков с различными структурами, в том числе и гибридными, при действии внешних силовых воздействий. Представлены зависимости напряженно-деформированного состояния исследованных элементов от изменений углов и последовательности укладки, толщины слоев и гибридности структуры. Выявлены закономерности расположения наиболее напряженных слоев в зависимости от структуры КМ.

## ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПАНТОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

**Ф.Э. дель Изола[1,3], В.А. Еремеев[2,3]**

[1] *Университет Рима Ла Сапиенца, Рим, Италия,*
[2] *Политехнический университет Гданьска, Гданьск, Польша,*
[3]*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

fdellisola@gmail.com; eremeyev.victor@gmail.com

Представлен обзор нового класса метаматериалов, основанных на так называемых пантографических решетках, образованных несколькими семействами длинных гибких стержней, соединенных существенно менее жесткими шарнирами. В настоящее время такого рода структуры получаются при использовании трехмерной печати из полимерных и металлических материалов. Соответ-

ствующие математические модели сводятся к начально краевым задачам в рамках градиентной теории упругости. Обсуждаются различные аспекты моделирования, ключающие в себя собственно моделирование, постановку и анализ краевых задач, сравнение с экспериментальными данными.
Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации в рамках программы мегагрантов, проект № 14.Z50.31.0046.

## О ПОСТАНОВКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ПЛАСТИН ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Л.А. Кабанова, В.И. Горбачёв**
*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
lakabanova@yandex.com

Работа посвящена сопоставлению двух подходов к получению постановки динамической задачи теории пластин. Рассматривается случай общей анизотропии материала. На базе метода гипотез двумя способами получены динамические уравнения, при этом результат метода прямого осреднения содержит слагаемые высокого порядка по толщине пластины. Изучается влияние данных слагаемых на собственные частоты колебаний пластины. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 14.577.21.0271, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0271).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ХАОТИЧНО АРМИРОВАННЫХ КОРОТКИМИ ВОЛОКНАМИ

**Р.И. Карамов[1], С.В. Ломов[2], И.В. Сергеичев[1], К.Ю. Зерщиков[3], И.Ш. Ахатов[1]**
[1]*Сколковский институт науки и технологий, Центр Проектирования, производственных технологий и материалов, Москва,*
[2]*Лёвенский католический университет, Кафедра материаловедения, Бельгия, Лёвен,*
[3]*ООО «Константа-2», Волгоград*
radmir.karamov@skoltech.ru

С использованием микро компьютерной томографии проведен многомасштабный анализ структуры полимерных композиционных материалов, хаотично армированных короткими стеклянными волокнами, и проведен расчет распределения ориентаций волокон методом идентификации отдельных волокон и глобальным методом анализа тензора структуры. На основании полученных экспериментальных данных томографии построены конечно-элементные модели представительных объемных элементов (ПОЭ) и проведены расчеты упругих свойств материалов. Модели ПОЭ валидированы на основании сравнения результатов расчетов и натурных механических испытаний материалов.

## УГЛЕРОДНЫЕ АЭРОГЕЛИ И ИХ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**А.И. Клявлина[1], Л.Х. Рысаева[2], Ю.А. Баимова[1,2]**
[1]*Башкирский государственный университет, Уфа*
[2]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
alsou1961@yandex.ru

На протяжении последних двадцати лет ведутся активные исследования в области синтеза и изучения новых наноматериалов, создавая основу развития нанотехнологий. Стоит отметить, что большой интерес представляют графен и другие углеродные структуры. Объектом данного исследования являются ячеистые структуры (или углеродные аэрогели), которые обладают высокой деформируемостью, хорошими сорбционными характеристиками и высокой проводимости. В этой работе мы рассматриваем ячеистую углеродную структуру, состоящую из повторяющихся ячеек. Стенки ячеек представляют собой графеновые наноленты. Показано, что структурные изменения существенно зависят от скорости деформации и направления нагрузки.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ВАН ФО ФЫ (ВАНИНА) В ЗАДАЧАХ МИКРОМЕХАНИКИ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

**Ю.В. Котин, А.Н. Полилов**
*Институт машиноведения РАН, Москва*
yury.kotin@yandex.ru

В работе рассматривается развитие метода Ван Фо Фы в задачах микромеханики волокнистых композиционных материалов. Этот метод позволяет решать двояко-периодические задачи, используя методы теории функций комплексного переменного и теории эллиптических функций. Нами метод Ван Фо Фы был распространен на некруглые многослойные волокна, волокна с многоуровневым строением, оптимизирован для решения задач с большим числом волокон и реализован в виде компьютерной программы. В данном виде метод Ван Фо Фы становится мощным средством для исследования задач микромеханики.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00372.

## ДИСКОВАЯ ТРЕЩИНА НА СТЫКЕ ДВУХ НЕОДНОРОДНЫХ ПО ГЛУБИНЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВ С РАЗНЫМИ УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

**Л.И. Кренев**

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

lkrenev@yandex.ru

Рассматривается осесимметричная статическая задача для дисковой трещины нормального отрыва в упругом неоднородном изотропном пространстве при несимметричном относительно трещины изменении модуля Юнга. Предлагается процесс приближенного решения задачи и определения коэффициента интенсивности напряжений, смещения берегов трещины и деформации ее оси.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 15-19-10056) и грантов РФФИ (18-07-01491-а, 17-08-01253-а).

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИТА С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

**Г.И. Кривень[1], Д.Б. Волков-Богородский[2], С.А. Лурье[1,2], Л.Н. Рабинский[1], Е.Д. Лыкосова[1]**

[1]*ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*

[2]*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, Москва*

Kriven_Galina@inbox.ru

Дается попытка оценки несущей способности модифицированного композита с вискеризованными волокнами для четырех случаев нагружения – одноосного растяжения, чистого сдвига в направлении вдоль волокон, всесторонней нагрузке поперек волокон, чистого сдвига в направлении поперек волокон. В качестве критерия прочности предложено использовать деформационный критерий по предельным деформациям. Сравнивается деформированное состояние двух видов вискеризованных волокнситых композитов с деформированным состоянием классического композита.

Работа выполнена в рамках программы научных исследований ИПРИМ РАН (No. АААА-А19-119012290177-0) и при частичной поддержке гранта РФФИ 18-01-00553-а.

## ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ МИКРОПОЛЯРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ ПАНЕЛЕЙ

**Е.Ю. Крылова[1], И.В. Папкова[2,3], О.А. Салтыкова[2.3], В.А. Крысько[2]**

[1]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов,*

[2]*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов,*

[3]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

kat.krylova@bk.ru

В работе построена теория нелинейной динамики гибких микрополярных цилиндрических сетчатых панелей. Из вариационного принципа Гамильтона-Остроградского на основе кинематических гипотез Кирхгофа-Лява с учетом геометрической нелинейности по модели Кармана получены дифференциальные уравнения в частных производных в перемещениях, краевые и начальные условия. Материал панели - псевдоконтинуум Коссера. Приводится пример решения для двух случаев: для полноразмерной микрополярной сетчатой квадратной в плане пластинки жестко защемленной по контуру при действии поперечной постоянной нагрузки. Пластина состоит из двух систем одинаковых ребер.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-01-00351а, 18-41-700001.

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ИНВАРНОГО СПЛАВА FE-36%NI

**К.А. Крылова[1], И.Х. Биткулов [1], Р.Р. Мулюков [1,2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

bukreevakarina@gmail.com

С помощью кручения под квазигидростатическим давлением получены наноструктурные образцы с размером фрагментов 100 нм. Последующий отжиг приводит к формированию дисперсной ОЦК фазы не наблюдаемой в крупнокристаллическом инваре. Это объясняет рост микротвердости за счет дисперсионного упрочнения до максимальной величины – 4500 МПа. Несмотря на повышение прочностных свойств выделение α-фазы вызывает рост теплового коэффициента линейного расширения. Однако варьируя температуру отжига после наноструктурирования можно добиться необходимого сочетания свойств теплового расширения и твердости инвара, что расширит область его применение.

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ПРОЦЕСС РАЗВОДОРАЖИВАНИЯ СКОМКАННОГО ГРАФЕНА

**К.А. Крылова[1], Ю.А. Баимова[1,2], Р.Р. Мулюков[1,2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

bukreevakarina@gmail.com

Методом молекулярно-динамического моделирования исследуется влияние сжимающей гидростатической деформации на процесс разводораживания скомканного графена. Скомканный графен представляет собой углеродную структуру, состоящую из большого количества графеновых чешуек, связанных между собой силами Ван-дер-Ваальса. Одним из важных направлений в исследовании углеродных структур является создание новых материалов для хранения и транспортировки водорода. В представленной работе показано, что поры скомканного графена могут использоваться как емкости для хранения атомов водорода, при этом гидростатическое сжатие является эффективным способом удержания водорода внутри структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук - МД-1651.2018.2.

## МЕЖКРИСТАЛЛИТНАЯ КОРРОЗИЯ КРИОКАТАНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 СТАНДАРТНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО СОСТАВА

**С.В. Крымский[1], Р.Р. Ильясов[1], А.А. Пинегина[1,2], Е.В. Автократова[1], О.Ш. Ситдиков[1], М.В. Маркушев[1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

pinegina_imsp@mail.ru

Методами оптической, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии исследовали эффект модифицирования состава, в том числе за счет замены марганца цирконием, на структуру и межкристаллитную коррозию (МКК) криокатаного алюминиевого сплава Д16. Анализ структурно-фазового состояния, интенсивности и глубины коррозионного поражения показал наличие двух взаимозависимых эффектов – от введения циркония и уменьшения примесей, приведших к отсутствию в модифицированном сплаве богатых Mn, Fe и Si грубых избыточных фаз, таких как $Al_{15}Si(CuFeMn)_3$ и T ($Al_{20}Cu_2Mn_3$), формировавших строчки при прокатке. Рассмотрено влияние режимов пост-деформационного старения на феноменологию и природу развития коррозионного поражения сплавов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10152-П.

## ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СТРУКТУРЫ И ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**М.В. Маркушев[1], Е.В. Автократова[1], С.В. Крымский[1], Ю.Л. Бурдастых[1,2], О.Ш. Ситдиков[1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

mvmark@imsp.ru

На примере сплава 1965 показан эффект выделений на формирование при интенсивной пластической деформации (ИПД) кручением под высоким давлением наноструктуры и твердость высокопрочных алюминиевых сплавов, легированных переходными металлами (ПМ). Наиболее развитая наноструктура с размером (суб)зерна 80 нм формируется при ИПД предзакаленного сплава, придавая ему аномально высокую твердость. Закалка и старение сплава с формированием выделений η-фазы меньшего размера и на порядок большей плотности, чем алюминиды ПМ, приводит к полному подавлению рекристаллизации, потере до 25 % прочности и трехкратному повышению пластичности. Обсуждена природа обнаруженных эффектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10152-П.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ДИФРАКЦИЯ ВОЛН ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ПОЛУПЛОСКОСТЕЙ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ КРИВИЗНОЙ

**А.А. Мацковский[1], Г.Л. Заворохин[2]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,* androbasrm@rambler.ru

[2]*Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова РАН, Санкт-Петербург*

zavorokhin@pdmi.ras.ru

Дана постановка нестационарной задачи дифракции волн точечного источника колебаний на прямолинейной границе раздела двух акустических сред с положительной эффективной кривизной. Это эталонная задача, моделирующая волновые процессы, возникающие вблизи дна океана в приближении моделью ``жидкого дна''. Применяя теорию функций комплексного переменного, мы предложили метод нахождения точного решения исследуемого класса задач. Найдено интегральное представление точного решения поставленной эталонной задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-00481.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РОСТА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ МЕДИ И ОЛОВА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРУЖЕНИИ

**А.В. Морозов[1,2], В.А. Клинков[3], А.В. Семенча[3], А.Б. Фрейдин[1,3,4], В. Мюллер[2]**

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург,*

[2]*Технологический университет Берлина, Берлин, Германия,*

[3]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,*

[4]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

morozov@tu-berlin.de

С использованием концепции тензора химического сродства численно и аналитически решена задача о росте интерметаллического соединения меди и олова в припоях на основе олова. Численно исследовано влияние температуры и механических напряжений, возникающих в процессе эксплуатации припоя на кинетику роста интерметаллической фазы. Проведен эксперимент по высокотемпературному отжигу микропроцессорных чипов с оловянным припоем. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00552

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРИСТОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ИНТЕРФЕЙСНЫМИ СВОЙСТВАМИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЯХ

**А.В. Наседкин[1], А.А. Наседкина[1], А.Н. Рыбянец[1], А. Раджагопал[2]**

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону,*

[2] *Индийский технологический институт Хайдарабада, Хайдарабад, Индия*

nasedkin@math.sfedu.ru

Рассмотрены задачи гомогенизации пористых пьезокерамических материалов, в которых на границах пор осажены частицы других веществ. Задачи решались по методам эффективных модулей и конечных элементов в представительном объеме с закрытой пористостью. Модификация свойств на границах пор учитывалась оболочечными элементами, а для металлизированных поверхностей задавались еще условия эквипотенциальности. Исследованы различные варианты модификации поверхностей пор и учета неоднородной поляризации пьезокерамической матрицы. Определены полные наборы эффективных модулей и дан анализ их зависимостей от пористости и типа модификации поверхностей пор.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-58-48009.

## ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПЛАСТИН С ОТВЕРСТИЯМИ

**Р.Д. Недин[1]**

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

rdn90@bk.ru

Исследована задача о колебаниях функционально-градиентной перфорированной пластины в условиях начального напряженного состояния. Построено численное решение прямой задачи с помощью метода конечных элементов, исследовано влияния уровней предварительных напряжений в пластине на АЧХ и резонансные частоты. Изучена задача об идентификации уровня плоского предварительного напряженного состояния на основе данных измерения частотных характеристик пластины.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10045.

## МНОГОУРОВНЕВАЯ ГОМОГЕНИЗАЦИЯ И ГЕТЕРОГЕНИЗАЦИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ

**А.С. Немов**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

nemov_as@spbstu.ru

Несмотря на то, что разработкой методов решения задач механики композиционных материалов ученые всего мира занимаются уже более 100 лет, многие из разработанных методов оказываются ограниченно применимыми или вовсе неприменимыми для новых композиционных материалов сложной структуры. В работе исследована применимость и оценена эффективность процедур многоуровневой гомогенизации (вычисления эффективных механических характеристик среды) и гетерогенизации (восстановления микрополей), основанных на различных алгоритмах, к двухуровневой структуре жилы сверхпроводящего кабеля катушки тороидального магнитного поля международного экспериментального термоядерного реактора ITER.

## МОДЕЛИ УПРУГОСТИ И ПРОЧНОСТИ ДЛЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

**А.И. Олейников**

*Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский*

a.i.oleinikov@mail.ru

Предлагаются новые модели упругого поведения и прочности полимерных композитов различных укладок. Решаются задачи об определении коэффициентов матриц жесткостей и податливостей композита по модулям упругости монослоев

на растяжение и сжатие в направлении волокон. Изучается влияние на упругие свойства композита комбинации знаков напряжений в монослоях. Даются конечные формулы для модуля Юнга в направлении растяжения или сжатия и оценок прочностей композита. Показывается, что применение линейного критерия обеспечивает нижнюю оценку прочности. Формулируется и обосновывается интервальная оценка прочности.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕШЕТОК С АУКСЕТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

**И.С. Павлов[1], А.А. Васильев[2]**

[1]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

[2]*Тверской государственный университет, Тверь*

ispavlov@mail.ru

Разработаны математические модели квадратной и гексагональной решеток, состоящих из частиц конечных размеров, и со сложными связями пружинного типа между ними. Показано, что квадратная решетка моделирует анизотропный материал, при некоторых значениях параметров микроструктуры являющийся ауксетическим. В результате численных исследований деформации гексагональных ячеек выявлено, что гексагональная решетка, состоящая из неточечных частиц, проявляет свойство ауксетичности лишь при несимметричности связей между частицами.

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ № 18-29-10073-мк и 19-08-00965-а.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**А.Н. Полилов, Н.А. Татусь**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

polilovan@mail.ru

Проведен анализ некоторых, нетрадиционных эффектов применения волокнистых полимерных композитов, связанных не только с механическими свойствами композитов, но и с возможной технологией изготовления композитных элементов, основанной на принципах оптимального проектирования, используемых Живой Природой. Проанализирована эффективность композитных, ветвящихся, биоподобных изделий, которые можно применять в качестве пружин – накопителей упругой энергии. На основе энергетического подхода показана возможность получения максимальных прогибов и накопленной упругой энергии разветвленных балок при различных видах нагружения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 18-08-00372 и 18-58-53020.

## ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВЯЗАННЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНОМ КОНТИНУУМЕ

**Ю.Н. Радаев[1], В.А. Ковалев[2]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,*

[2]*Московский городской университет управления Правительства Москвы, Москва*

y.radayev@gmail.com, radayev@ipmnet.ru

Под сложным континуумом понимается математический образ, эквивалентный дифференцируемому многообразию, допускающему вложение во внешнее плоское пространство, возможно, большей математической размерности. С помощью методов и формализма физических теорий поля исследуются гиперболические модели процессов деформирования сложных континуумов и связанных полей (в частности, температурного). Сформулирована и решена проблема поиска функциональных аргументов плотности действия, инвариантных относительно собственно ортогональных преобразований внешней координатной системы. С теоретико-полевых позиций изучаются модели нелинейно упругого континуума, допускающего изометрическое погружение во внешнее плоское пространство, и связанной гиперболической термоупругости в аспекте моделирования незатухающих волн второго звука в твердых телах. Найдены решения ряда задач, относящихся к распространению связанных термоупругих волн *второго звука* вдоль длинных цилиндрических волноводов. Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310381-8) и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-01-00844 “Моделирование термомеханических процессов в сложных средах с помощью принципа термомеханической ортогональности”).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ В РАМКАХ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

**Ю.О. Соляев[1,2], В.А. Короленко[2]**

[1]*Институт прикладной механики РАН, Москва,*

[2]*Московский авиационный институт, Москва*

yos@iam.ras.ru

Рассматривается проблема оценки напряженно-деформированного состояния упругих тел с трещинами и концентраторами напряжений в рамках моделей градиентной теории упругости, позволяющих получать регулярные решения, свободные от проблемы сеточной зависимости результатов конечно-элементного моделирования. Показана возможность построения численных решений как для упрощенных типовых задач, допускающих аналитическую проверку результатов численного моделирования, так и для более сложных задач, которые могут быть использованы для уточненного моделирования экспериментов и проверки работоспособности моделей в условиях сложнонапряженного состояния материалов. В расчетах использованы несколько вариантов определяющих соотношений для изотропных тел, включая общую модель Миндлина, содержащую пять дополнительных материальных

констант по отношению к классической теории упругости, и упрощенные двух- и однопараметрические модели. Показана корректность и сходимость получаемых численных решений.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20043.

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**О.А. Староверов, В.Э. Вильдеман**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

cem_staroverov@mail.ru, wildemann@pstu.ru

В рамках работы разработаны оригинальные методики исследования поведения композиционных материалов в условиях комплексных статических, ударных и циклических механических воздействий с совместным использованием испытательного и диагностического оборудования. Получены новые экспериментальные данные отражающие закономерности изменения прочностных и деформационных характеристик полимерных композиционных материалов с различной ориентацией укладки армирующих слоев в процессе усталостного накопления повреждений с различными режимами нагружения. Выявлены новые зависимости влияния на остаточные прочностные характеристики и характер разрушения образцов углепластиковых композиционных материалов при низкоскоростном ударном и последующим квазистатическом нагружении. Проведен цикл испытаний на квазистатическое растяжение с дополнительными крутильными вибрационными воздействиями трубчатых углепластиковых образцов. Получены новые опытные данные, отражающие влияние дополнительных вибрационных воздействий на прочностные свойства и вид разрушения образцов. Выполнено экспериментальное исследования влияния предварительного трехточечного ударного изгиба на изменение остаточных прочностных и деформационных свойств стеклопластиковых образцов.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00763 А.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМАТЕРИАЛОВ

**В.М. Фомин[1,2], А.А. Филиппов[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

filippov@itam.nsc.ru

В настоящей работе рассматривается экспериментально-теоретический метод определения зависимости упругих характеристик наночастиц в составе механической смеси в зависимости от диаметра частиц. Метод основан на разрешении уравнений осреднения упругих характеристик гетерогенного материала. В качестве объектов исследования выбраны порошки диоксида кремния в полимерных композитах на основе эпоксидной смолы. Добавление нанопорошков кремния приводит к росту модуля упругости. Для порошков одного происхождения наблюдается рост модуля упругости с уменьшением характерного диаметра частиц наполнителя при постоянной концентрации.

## ТЕНЗОР ХИМИЧЕСКОГО СРОДСТВА В МЕХАНОХИМИИ ФРОНТОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

**А.Б. Фрейдин[1,2,3], А.В. Морозов[1,4], W.H. Muller[4], M. Poluektov[5], Ł. Figiel[5]**

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург,*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,*

[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,*

[4]*Technische Universität Berlin,*

[5]*International Institute for Nanocomposites Manufacturing, WMG, University of Warwick*

alexander.freidin@gmail.com

Взаимосвязи между напряженно-деформируемым состоянием и распространением фронта химической реакции между твердым деформируемым компонентом и диффундирующим компонентом исследуются на основе использования тензора химического сродства. Приводятся решения связанных краевых задач механохимии для упругих и неупругих компонентов реакции. Демонстрируется, что напряжения могут ускорять, замедлять и блокировать распространение фронта. Строятся запретные зоны, образованные деформациями, при которых фронт реакции не может распространяться. Исследуется устойчивость фронта реакции при приближении к состоянию блокирования.
Работа выполнена при поддержке РНФ. Грант № 19-19-00552.

## ДИСКРЕТНОСТЬ СТРОЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

**В.Э. Цой [1], Т.Б. Дуйшеналиев [1], Б. Цой [2], В.Н. Щугорев [1]**

[1]*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва*

[2]*ООО "Кронул", Москва*

v_tsoi@mail.ru

При внешнем воздействии (температуры, напряжения, масштаба, поверхностно-активных сред, физических и химических добавок и др.) возникает дискретный спектр уровней прочности, долговечности и других прочностных характеристик, обусловленный гетерогенностью строения, наличием дефектов, дискретно распределенных по размерам, термофлуктуационно-релаксационными про-

цессами, характером и видом внешнего воздействия на материал. В связи с этим, работа посвящена исследованию дискретного спектра прочностных и других структурно-чувствительных свойств материалов, разбросу экспериментальных данных и его устранению.

## КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНО НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ

**В.В. Шадрин[1,2], О.К. Гаришин[1], Ю.В. Корнев[3]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь,*

[3]*Институт прикладной механики РАН, Москва*

shadrin@icmm.ru

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований эластомерных композитов с дисперсными микро и нанонаполнителями. Механические испытания на одноосное и двухосное растяжение–сжатие проводились на четырехвекторном испытательном стенде Zwick/Roell. Термо-вязко-упругие свойства изучались на динамо-механическом анализаторе DMA/STDA861. Эксперименты показали, что ненаполненный эластомер является практически упругим материалом. При введении наполнителей материал становится вязкоупругим: появляется петля гистерезиса, ее площадь (диссипативные потери) увеличивается по мере нарастания амплитуды цикловых деформаций.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект № 17-08-01118

## РАВНОВЕСНЫЕ ДВУХФАЗНЫЕ И ОПТИМАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ

**Л.Л. Шарипова[1], А.Б. Фрейдин[1,2,3,4]**

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург,*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,*

[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,*

[4]*Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing*

sleah07@gmail.com, alexander.freidin@gmail.com

Рассматривается взаимосвязь двух задач, возникающих в различных областях механики материалов: построение предельных поверхностей фазовых превращений и диаграмм деформирования и оптимальный дизайн двухфазных 3D композитов в смысле минимизации их энергии. На основе построения точных нижних оценок энергии двухфазных микроструктур в пространстве деформаций строятся предельные поверхности фазовых превращений. Далее для различных путей деформирования строятся диаграммы деформирования и определяются двухфазные минимизирующие микроструктуры. Демонстрируются принципиальные отличия задач для оптимальных композитных и равновесных двухфазных микроструктур.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-19-00552.

## Подсекция III-7. НЕКЛАССИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

### СТАТИЧЕСКАЯ И УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ИНТЕНСИВНО ДЕФОРМИРОВАННОГО СПЛАВА Al-5Mg-0,2Mn-0,2Sc-0,08Zr

**Е.В. Автократова [1], О.Ш. Ситдиков [1], М.В. Маркушев [1], М.Л. Линдеров [2], А.Ю. Виноградов [2,3], Д.Л. Мерсон [2]**

[1] *Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*

[2] *Лаборатория физики прочности и интеллектуальные диагностические системы, Тольяттинский Государственный Университет, Тольятти, Россия*

[3] *Department of Engineering Design and Materials, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway*

avtokratova@imsp.ru

Исследовали влияние интенсивной пластической деформации, реализованной всесторонней изотермической ковкой, а также ее сочетанием с холодной прокаткой и кручением под высоким давлением, на характеристики статической и усталостной прочности слитка термически неупрочняемого алюминиевого сплава Al-5Mg-0,18Mn-0,2Sc-0,08Zr. Показано, что наиболее эффективной обработкой, повышающей как статическую, так и усталостную прочность сплава, является сочетание всесторонней изотермической ковки и холодной прокатки, приводящей к формированиюнагартованной (ультра)мелкозернистой структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10152-П.

### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИНАМИКИ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ ТЕЛ

**А.Е. Андреев [1], А.С. Горобцов[1], В.В. Гетманский[1]**

[1] *Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

vm@vstu.ru

Рассматривается численный метод решения задач механики сплошной среды, основанный на трактовке уравнения Эйлера как уравнения, полученного из условного экстремума функционала. Обосновывается эквивалентная дискретная математическая модель такого уравнения как системы связанных тел с избыточными связями. Показано, что такая модель учитывает геометрическую и конструкционную нелинейность. Сравниваются результаты решения плоской задачи напряженно деформированного состояния предложенным методом и методом конечных элементов. Анализируются эффективность метода в технологиях параллельного вычислений.

### ЭФФЕКТЫ И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**А.В. Бабушкин**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

bav651@yandex.ru

Представлены эффекты механического поведения КМ при термомеханических воздействиях.Выявлены аномалии зависимостей деформации от объемного содержания пор при испытании образцов порошкового пористого железа на циклический изгиб; температурных зависимостей прочности и жесткости стеклопластиков;положительная бимодульность при деформировании перекрестно армированных стеклопластиков и смешанных текстолитов; влияния предварительного циклического нагружения и температуры на остаточную прочность ПКМ;множественность типов разрушения металлокомпозитови ПКМ при испытаниях остаточной прочности после циклического нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 01-18-00673.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРУПРУГОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ МЕРЫ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ

**Б.Д. Аннин[1,2], К.В. Багров[1]**

[1] *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск*

[2] *Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

k.bagrov@g.nsu.ru

Исследуется трёхмерная модель гиперупругого тела, подверженная большим деформациям. Рассмотрена новая мера деформаций, основанная на QR-разложении градиента деформаций. Показано, что при использовании такой меры аналитические выражения для связи между параметрами напряжённо-деформированного состояния оказываются более явными, чем при традиционном подходе. Предложен способ применения новой меры деформации в численном эксперименте для произвольной триангулированной трёхмерной модели с линейными функциями формы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00511 А.

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАВ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПЬЕЗОКЕРАМИК

**Т.И. Белянкова[1,2], В.В. Калинчук[1,2]**

[1]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

[2]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

tbelen415@mail.ru

Предложен подход к моделированию пьезоэлектрической структуры с неоднородным покрытием из различных материалов. Полагается, что свойства покрытия непрерывным образом меняются по толщине от параметров одного материала до другого. Выбор функциональных зависимостей изменения свойств покрытия определен соотношением модулей материалов, величиной области проникновения одного материала в другой и ее расположением. Для задач с электрически открытой или закрытой свободной поверхностью исследовано влияние характера и локализации неоднородности покрытия на особенности поведения ПАВ в широком частотном диапазоне.

Работа выполнена приподдержке грантов РФФИ № 19-08-01051, № 19-01-00719, № 18-08-01012.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРИСТОГО ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ВСЕСТОРОННЕГО НЕРАВНОМЕРНОГО СЖАТИЯ

**И.М. Березин[1, 2], А.Г. Залазинский [1]**

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

[2]*Уральский Федеральный университет, Екатеринбург*

berezin@imach.uran.ru

Рассматривается процесс осадки заготовок из пористого титана, заключенных в пластически деформируемые бандажи с кольцевыми проточками. Метод позволяет осуществить реализацию различных условий всестороннего неравномерного сжатия путем варьирования величины осевых и радиальных давлений на уплотняемую заготовку. Моделирование выполнено на микро- и макромасштабном уровнях. Стыковка решений, осуществлялась путем использования результатов определения напряженно-деформированного состояния на верхнем масштабном уровне для задания граничных условий на поверхностях представительных объемов нижнего масштабного уровня.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00107.

## ПРИМЕНЕНИЕМЕТОДА АСИМПТОТИЧЕСКОГО УСРЕДНЕНИЯВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.Н. Власов, Д.Б. Волков-Богородский**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

bah1955@yandex.ru

В работе развивается двухуровневая схема асимптотического усреднения уравнений с быстроосциллирующими коэффициентами в параметрическом пространстве в применении к структурно-неоднородным материалам с плавно изменяющейся регулярной структурой. На основе формального асимптотического разложения решения в обобщенный*N*-ряд Бахвалова получена полная цепочка локальных задач на представительной ячейке и усредненное уравнение с плавно изменяющимися коэффициентами. Развиваемая схема используется для моделирования эффективных свойств функционально-градиентных композитных материалов.

Работа выполнена в рамках государственной Программы фундаментальных научных исследований (№АААА-А19-119012290177-0).

## ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОСТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ В ОПИСАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ И РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ TiNiиFe–Mn–Si

**А.Е. Волков, М.Е.Евард, Ф.С.Беляев**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт Петербург*

a.volkov@spbu.ru

Рассмотрена микроструктурная модель сплавов с памятью формы (СПФ) для расчета обратимой фазовой деформации, микропластической деформации, накопление деформационных дефектов, поврежденности и разрушения. Выбор внутренних переменных и тензор деформации Бейна соответствует конкретному СПФ. Сформулированы условия превращения, микропластического течения и эволюционные уравнения для обратимых и необратимых дефектов. Выполненные расчеты количества циклов деформации до разрушения для сплавов Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si и Ti–50 at.% Ni, показали хорошее качественное соответствие с результатами экспериментов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-01-00594 и 19-01-00685.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛО-КЕРАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ИСПОЛЬЗУЯ МЕТОД АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**А.А. Голышев**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

alexgol@itam.nsc.ru

В работе исследуется получение износостойких, коррозионно-стойких, механически прочных покрытий на основе $B_4C$ и ВТ6 методом аддитивных технологий. Исследуются условия формирования металлокерамических треков от параметров лазерного воздействия и концентрации керамики в исходящей порошковой смеси. Найдены оптимальные условия для создания качественных наплавочных монолитных слоев обладающих минимальной шероховатостью поверхности и минимальным количеством пор в зависимости от параметров лазерного воздействия и состава покрытия. Экспериментальные данные получены по морфологии и микроструктуре наплавленных слоев.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-00052.

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Д.В. Гундеров[1,2], Е.В. Болтынюк[1], Е.В. Убыйвовк[1], А.В. Лукьянов[1], А.А. Чуракова[1,3], Р.Н. Асфандияров[2], A. Kilmametov[4], А.И. Муллаянов[5], Р.З. Валиев[1,2]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург*

[2]*Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, г. Уфа*

[3]*Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, г. Уфа*

[4]*Institute of Nanotechnology, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany*

[5]*Башкирский Государственный Университет, г. Уфа*

dimagun@mail.ru

Исследовано влияние интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) на структуру и механические свойства объемных металлических стекол (ОМС) на основе Zr. В результате ИПДК структура ОМС значительно трансформируется, формируется высокая плотность полос сдвига, растёт свободный объем. Создана методика, которая позволила впервые провести испытания на трехточечный изгиб на микрообразцах, вырезанных из ОМС после ИПДК. При испытаниях на растяжение образцы ОМС до и после ИПДК разрушаются хрупко при напряжении около 1700 МПа, тогда как при испытаниях на трехточечный изгиб $\sigma_p$ превышает 3000 МПа и фиксируется пластическое течение.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ No.6.65.43.2017 и проекта РФФИ 17-08-00974.

## НЕКЛАССИЧЕСКОЕ ТОЛКОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДИАГРАММ ОСЕВОГО РАСТЯЖЕНИЯ (СЖАТИЯ) ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

**Т.Б. Дуйшеналиев[1], Б.Т. Мекенбаев[2], В.Э. Цой[1], В.Н. Щугорев[1]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва*

[2]*Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, г. Бишкек*

duishenaliev@mail.ru

В работе проведено интегрирование уравнения осевого движения, при котором использован обобщенный закон Гука и граничные условия на основании и боковой поверхности цилиндрического образца. Получено уравнение, связывающее нагрузку с осевой и кольцевой деформациями. Это уравнение при одних и тех же величинах констант хорошо описывает опытные данные на всех уровнях деформирования и дает основание для иного толкования диаграммы нагрузка - деформация.

## ЛИНЕЙНЫЙ ТЕНЗОР ДЕФОРМАЦИЙ КОШИ И ФУНКЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

**Т.Б. Дуйшеналиев[1], А.С. Дуйшембиев[2], А.А. Орозбаев[2], В.Е. Хроматов[1]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва*

[2]*Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, г. Бишкек*

duishenaliev@mail.ru

Конечные деформации упругих тел могут описываться линейным тензором деформаций Коши. Векторное поле можно определить по его дивергенции и ротору. Это поле может быть представлено в виде уммы безвихревого поля и соленоидального поля. Отыскание такого поля приводит к решению дифференциальных уравнений в частных производных при некоторых краевых условиях. Часто возникает другая задача. К примеру, решение статической краевой задачи в напряжениях дает поле тензора напряжения, из которого можно определить поле линейного тензора деформаций Коши. Далее возникает задача отыскания поляперемещения, соответствующего тензору Коши. Данная работа посвящена этой проблеме.

## РАСШИРЕННАЯ ТЕОРИЯ ОБОЛОЧЕК N-ГО ПОРЯДКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧАМ МЕХАНИКИ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

**С.И. Жаворонок[1]**

[1]*Институт прикладной механики РАН, Москва*

Zhavoronok@iam.ras.ru

Предложенная теория оболочек N-го порядка основана на Лагранжевом формализме аналитической динамики континуальных систем. Модель оболочки задается на двумерном многообразии переменными поля, плотностью лагранжиана и уравнениями связей.

Переменные поля первого рода определяются коэффициентами разложения вектора перемещения по биортогональной базисной системе функций нормальной координаты. Уравнения связей следуют из краевых условий, перенесенных с лицевых на базовую поверхность оболочки. Рассмотрены теории низших порядков.Приведены примеры решения задач о дисперсии волн в функционально-градиентных телах и об устойчивости нетонких неоднородных пластин.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00695-а.

## МОДЕЛЬ ОДНОМЕРНОГО КОНТИНУУМА КОССЕРА С НЕУПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

**О.А. Иванова**[1]

[1]*ЗАО «АйТи Десижн», г. Москва*

O.Ivanova.88@bk.ru

Рассмотрены два типа моделей одномерного континуума Коссера, построенных на основе метода механического «конструктивного» моделирования, с частично идеально пластическими свойствами. Проведена линеаризация уравнений движения. Исследованы постановки краевых задач статики. Отмечено наличие бесконечного множества форм равновесия, выделены случаи единственности решений. Рассмотрены аналогичные модели с частично вязкоупругими свойствами, уравнения движения линеаризованы. В предположении о специальном виде решения исследовано общее решение задачи о собственных колебаниях. Получены численные решения задачи.
Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, проект № 16-01-00669.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИСПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

**С.А. Казарина, И.В. Мишустин, А.Л. Сильченко**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

svetlans@mail.ru

Проведены опыты при одноосном растяжении и сжатиисплавов с памятью формы (СПФ), соответствующие процессам мартенситной неупругости, накопления деформаций прямого превращения, перекрестного упрочнения, релаксации напряжений и ограниченной ползучести.Установлены как количественные, так и качественные различия диаграмм деформированияпри растяжении и сжатии. Для их учета в нелинейной модели фазово-структурного деформирования СПФ предполагается зависимость материальных функций от безразмерных параметров вида напряженного и деформированного состояния.
Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А19-119012290118-3 при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-01-00216_а).

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

**В.В. Калинчук**[1,2], **В.Б. Широков**[1,2]

[1]*Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

[2]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

kalin@ssc-ras.ru

Обсуждаются методы исследования динамики неоднородных преднапряженных пьезоактивных гетероструктур, основанных на феноменологической теории фазовых переходов. Для наноразмерных сегнетоэлектрических тонких пленок $BaTiO_3$ и BST, нанесенных на подложкуMgO, приведены материальные параметры. Исследованавозможностьиспользования поверхностных акустических волн (ПАВ) SH-типа или волн Гуляева-Блюштейнав акустоэлектронных устройствах, выполненных на структурах «тонкая сегнетоэлектрическая пленка-диэлектрическаяподложка».
Работа выполнена в рамках госзадания ЮНЦ РАН (проект 01201354242)при финансовой поддержке РФФИ, (гранты 19-01-00719 и 19-08-01051).

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО СВАРНОГО ШВА АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ Mg И Cu

**Е.В. Карпов**[1], **А.Г. Маликов**[2], **А.М. Оришич**[3]

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2, 3] *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

evkarpov@mail.ru

Проведены экспериментальные исследования деформирования и разрушения лазерных сварных швов алюминийлитиевых сплавов, легированных Mgи Cu. Исследовано влияние термомеханообработки сварных соединений на структуру, прочность и деформативность шва, а также влияние температуры на разрушение шва и его механические характеристики. Для сплава 1420 определены границы возможного упрочнения шва прессованием. Исследовано влияние закалки на микроструктуру и механические свойства сплава В-1461, определен режим термообработки сварных соединений, при котором предельная нагрузка достигает 96%, а деформация – 150% от характеристик исходного сплава.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-79-20139.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

**Ф.Б. Киселев[1], С.В. Шешенин[1], Н.Б. Артамонова [1], Д.М. Семенов [1]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

afi-ko@yandex.ru

Получены связанные уравнения трехмерной моментной теории упругости асимптотическим методом, описывающие свойства материалов с искусственной периодической структурой. На основе данного асимптотического подхода рассмотрены слоистые и функционально-градиентные материалы с «аномальными» свойствами, в частности, с отрицательным коэффициентом Пуассона.С помощью моделирования на основе трехмерной структуры, расчетным путем получены не только макро отклик материала на деформирование, но и распределение напряжений на уровне структуры. Исследовано влияние отрицательного коэффициента Пуассона на коэффициенты передачи порового давления и тепловые напряжения. Также исследовано влияние связанности определяющих соотношений на макроуровне и неоднородности структуры на микроуровне на динамические характеристики искусственных структур.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-51-53008.

## О СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ИСХОДНОЙ РАЗНОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

**Д.А. Китаева, Г.Е. Коджаспиров**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

dkitaeva@mail.ru

В рамках математического моделирования поведения группы промышленных алюминиевых сплавов с исходной разнозернистой структурой решается задача установления особенностей развития размытых фазовых переходов, наблюдаемых в условиях динамической сверхпластичности, с использованием функциидельной теплоемкости и энтропии. Используемое определение «динамическая сверхпластичность» отражаетпоследовательную смену состояний, которая происходит в материале с исходной разнозернистой структурой вменяющихся температурно-скоростных условиях. Сопоставление полученных теоретических и имеющихсяэкспериментальных данных проведено для сплавов АМг5 и Д18Т.

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

**И.С. Кодиров[1], А.Г. Рааб[1], Г.Н. Алешин[1]**

[1] *Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия*

Разработка новых методов ИПД для получения продукции массового производства с улучшенными свойствами за счет измельчения исходной структуры является актуальной задачей. Исследован метод активного изгиба для измельчения структуры и создания градиентных структурных состояний в прутках меди марки М1. Активный изгиб проводили по схеме «Conform». Проведён анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) методом компьютерного моделирования и исследована микроструктура. Данный метод обеспечивает за четыре цикла обработки накопление высокого уровня деформации (e=3-4) и формирование УМЗ структуры.

Настоящая работа выполнена за счёт средств Гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований, выполняемого в УГАТУ (г. Уфа, РФ), № 17-08-00720/18.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ТЕРМОУПРУГИХ ТЕЛАХ

**Г.Ю. Леви[1], В.В. Калинчук[1]**

[1]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

galias@yandex.ru

Исследуются динамические связанные краевые задачи о колебаниях преднапряженных термоупругих полуограниченных тел: слоя, структурно-неоднородного полупространства. Возбуждение колебаний происходит под действием осциллирующего на поверхности тела теплового потока. Аналитически выведены и получены численные значения ядер интегральных представлений решений задач. Вычислены полюса функций Грина краевых задач для полуограниченных тел. Для проведения анализа влияния различных параметров задач построены графики дисперсионных кривых.

Работа выполнена в рамках выполнения госзадания ЮНЦ РАН (проект 01201354242) при финансовой поддержке РФФИ, гранты 19-01-00719, 19-08-01051 и 18-08-01012)

## СВОЙСТВА ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙВ ОДНОРОДНЫХ И СЛОИСТЫХ ТЕРМОУПРУГИХ ТЕЛАХ

**Г.Ю. Леви[1]**

[1]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

galias@yandex.ru

Исследуются динамические связанные контактные задачи о возбуждении гармонических колебаний на поверхности термоупругих тел. Колебания вызываются распределенной в некоторой области на поверхности тел осциллирующей температурой. Краевые задачи со смешанными граничными условиями на поверхности методами операционного исчисления сведены к интегральному уравнению первого рода относительно неизвестной функции распределения теплового потока в зоне контакта. Методом граничных

элементов построено его решение. Исследованы особенности формирования волнового поля в зависимости от условий на границе раздела составляющих среды.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-08-01051, 18-08-01012.

## О РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРАХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

**М.О. Леви**

*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

mlevi@mindonline.ru

Изучается задача о гармонических колебаниях в электромагнитоупругих композитах. Колебания могут быть инициированы расширенным вектором нагрузки, включающим себя продольную и вертикальную составляющую механических смещений, а также электрическую индукцию, заданные на поверхности структуры.Граничные условия предполагают полное механическое сцепление для всех слоев структуры. Электрические условия на поверхности могут быть как электрически открытыми, так и учитывать возможность заземления границы. Магнитные условия аналогично, электрическим могут описывать непрерывность полей в двух средах, либо указывать на изоляцию магнитного поля между ними. Построена функция Грина среды. Получены дисперсионные кривые и фазовые скорости для различных значений геометрических размеров магнитной прослойки и типов материалов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 19-01-00719, 19-08-01051, 18-08-01012.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ТЕРМОУПРУГИЕ ВОЛНЫ В СРЕДЕ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

**А.В. Леонтьева[1], В.И. Ерофеев [1], А.В. Шекоян [2]**

[1]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*

[2]*Институт механики НАН Республики Армения, Ереван*

aleonav@mail.ru

В работе изучается распространение плоских продольных волн в безграничной среде с точечными дефектами, находящейся в нестационарном неоднородном температурном поле. Рассматривается самосогласованная задача, учитывающая как влияние акустической волны на образование и перемещение дефектов, так и влияние дефектов на особенности распространения акустической волны. Показано, что в случае отсутствия диффузии тепла система уравнений сводится к нелинейному эволюционному уравнению (формальное обобщение уравнения КдВБ) относительно смещений частиц среды. Отмечено, что диссипативные эффекты, обусловленные наличием дефектов, преобладают над дисперсией, связанной с миграцией дефектов в среде.
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-10073 мк).

## МЕХАНИКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ

**А.Р. Лепешкин[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова, Москва*

lepeshkin.ar@gmail.com

Характеристики температуропроводности, в частности электронной теплопроводности (электротеплопроводности) металлических материалов используются при расчете теплового и термонапряженного состояния лопаток и дисков ротора турбины. Разработаны оригинальные методика и устройство с теплопроводниками для определения теплофизических характеристик материалов на разгонном стенде с использованием вакуумной камеры в условиях центробежных сил инерции. Приведены результаты исследований нестационарного нагрева теплопроводников в разных направлениях: радиальном и окружном направлениях в поле центробежных ускорений (центробежных сил инерции). Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что температуропроводность и, следовательно, электронная теплопроводность радиального и окружного теплопроводников увеличивается при увеличении частоты вращения по сравнению со статическим состоянием без вращения. Таким образом, механика процесса увеличения теплопроводности значительно связана с увеличением электронной проводимости (скорости дрейфа электронов) металла под действием центробежных сил инерции. Указанное изменение теплопроводности влияет на термонапряженное состояние рабочих лопаток турбин.

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

**А.Р. Лепешкин[1], Н.Г. Бычков[1]**

[1]*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова, Москва*

lepeshkin.ar@gmail.com

Проведены расчетные исследования напряженного состояния теплозащитных керамических покрытий со столбчатой структурой лопатки турбины ГТД в поле действия центробежных сил. В расчете определяются напряжения в столбиках покрытия с учетом разных случаев их закрепления под действием изгиба в поле центробежных сил. Приведены результаты расчета напряженного состояния столбиков с учетом конусности. Получены распределения напряжений по высоте одиночных столбиков и столбиков, находящихся в блоках, керамического покрытия при воздействии центробежных сил. Приводится оценка допустимой толщины керамического покрытия лопатки турбины ГТД в условиях воздействия центробежных сил.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАРЕНИЯ НА ОСТАТОЧНУЮ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ

**Д.С. Лобанов**[1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

cem.lobanov@gmail.com

Представлены результаты экспериментальных исследований остаточной прочности и структурной деградации образцов конструкционного стеклопластика конструкционного назначения после предварительного температурного старения при повышенных температурах (120ºС, 160ºС, 200ºС) в течении 5 и 15 суток. Построены зависимости остаточной прочности и модуля упругости от температуры и длительности старения. Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке гранта РНФ № 18-79-00209.

## ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ, ВЫЗВАННАЯ ФАЗОВЫМИ И СТРУКТУРНЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ, ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

**А.А. Мовчан, С.А. Думанский, С.А. Казарина, А.Л. Сильченко**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

Movchan47@mail.ru

Приводятся экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что фазовые и структурные превращения могут вызвать потерю устойчивости элементов из сплавов с памятью формы. Обсуждаются концепции, в рамках которых эти эффекты могут быть описаны. Сформулированы несвязанная, связанная и дважды связанная постановка соответствующих задач устойчивости. Приводятся аналитические решения краевых задач. Показано, что наименьшие значения критических параметров получаются при решении задач в связанной постановке в рамках концепции варьируемой нагрузки. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А19-119012290118-3 при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-01-00216.

## ОБЪЕДИНЕННАЯ МОДЕЛЬ ФАЗОВОГО И СТРУКТУРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

**А.А. Мовчан**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

movchan@mail.ru

Предлагается модель развития деформаций в сплавах с памятью формы, связанных с фазовыми и структурными превращениями. Модель изменения деформаций, связанного с фазовыми переходами не использует понятия поверхности нагружения, т.е. этот процесс происходит при любых, в том числе - малых или убывающих напряжениях. Модель развития деформаций, связанного со структурными переходами строится как аналог теории пластического течения. При этом поверхность нагружения для структурного деформирования изменяется, как при фазовых, так и при структурных переходах.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А19-119012290118-3 при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант№ 17-01-00216.

## О ПРИМЕНЕНИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧЕ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И МАГНИТОСТАТИКИ

**А.Н. Мушников**

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

mushnikov@imach.uran.ru

Рассмотрена возможность применения программного комплекса, состоящего из решателя GetDP и генератора сетки Gmsh для решения связанной задачи механики и магнитостатики о намагничивании внешним полем объекта из ферромагнитного материала, подверженного упругому деформированию. Величины магнитной проницаемости каждого элемента рассчитываются по модифицированной модели Джайлса-Атертона, которая учитывает влияние механических напряжений на намагниченность.

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА TiNi ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Е.С. Остропико**[1], **А.И. Разов**[1],**А.С. Моторин**[2]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург*

es-ostropiko@mail.ru

В работе представлены результаты исследования влиянияскорости деформирования при различных температурах на проявление однократной и обратимой памяти формы в сплаве TiNi. Исследования на растяжение показали, что высокая скорость деформирования не приводит к улучшению функциональных свойств. Однако испытания на сжатие показали, что увеличение скорости деформирования может привести к улучшению функциональных свойств. Так величины однократной памяти формы и обратимой памяти формы мартенситного типа после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60$^{o}$C выше, чем после квазистатического сжатия. Обратимая память формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРО-ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ С ВНЕШНИМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦЕПЯМИ НА ОСНОВЕ ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛОГА

**Д.А. Ошмарин, М.А. Юрлов, Н.В. Севодина, Н.А. Юрлова**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

oshmarin@icmm.ru

В работе предложен подход к анализу динамического поведения электромеханической системы (конструкции с пьезоэлементом и внешней электрической цепью) на основе её электрического аналога, представляющего собой дискретную электрическую систему с сосредоточенными параметрами в виде эквивалентной электрической схемы. Полученная дискретная система является полным аналогом исходной электромеханической системы с точки зрения частотных характеристик и протекающих в ней электрических процессов.Данный аналог является эффективным инструментом для определения динамических характеристик электромеханических систем, в том числе содержащих внешние электрические цепи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-590152-р_а.

## ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ, НАГРЕВАЕМОМ НЕПРЕРЫВНЫМ ГАУССОВЫМПОТОКОМ ТЕПЛА

**В.А. Пинскер**

*АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва*

Victorp2009@yandex.ru

В интегральном виде получено точное аналитическое решение задачи линейной несвязанной термоупругости. Изучены асимптотики всех найденных напряжений при малых и больших временах, вблизи и вдали от границы. В замкнутом виде построены распределения осевой и сдвиговой компонент. На свободной поверхности обнаружена независимость разности окружной и радиальной компонент от величины ν. Показано, что при стационарном плосконапряжённом состоянии в полупространстве возможны только сжимающие напряжения, а распределение окружной компоненты по глубине носит немонотонный характер. Определен деформационный профиль границы и найдена его предельная форма. Аналитически рассчитана кривизна нагретой поверхности. Исследована возможность механических разрушений.

## ТЕРМОУПРУГОСТЬ ЛОПАТОК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

**В.А. Пухлий[1], С.Т. Мирошниченко [1],А.А. Журавлев [1], А.К. Померанская[2]**

[1]*Севастопольский государственный университет, Севастополь*

[2]*Предприятие «Аэротекс», Москва*

pu1611@rambler.ru

Рассматриваются двумерные краевые задачи по расчету НДС конструкционных элементов центробежных насосов ядерной энергетики (лопаток и дисков) при воздействии высокотемпературного нагрева и радиационного облучения. К решению краевой задачи теории оболочек, описываемой системой уравнений в частных производных.применяется аналитический подход, основанный на применении метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф.В.А.Пухлий и изложенным им в академической печати.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта №18-48-920002.

## АКТИВНЫЙ ИЗГИБ КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ

**Г.И. Рааб [1],Р.Н. Асфандияров [1,2], А.Г. Рааб[1], Д.А.Аксенов[1,2], Г.Н. Алешин[1],И.С. Кодиров[1],О.Л. Рыжиков[3]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет,Уфа*

[2]*Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа*

[3]*Башкирский государственный университет, Уфа*

giraab@mail.ru

Представлены результаты исследования промышленно-перспективного метода обработки длинномерных металлических заготовок с использованием принципов интенсивной пластической деформации (ИПД) – метода активного знакопеременного изгиба. Установлено, что в процессе многоцикловой обработки формируется градиентный тип структуры, приводящий к повышению механических свойств длинномерных образцов – с 220 до 350 МПа с незначительным уменьшением поперечного сечения. Математическим моделированием исследована механика процесса. Установлена положительная роль стесненного изгиба при деформировании заготовок.

Данные исследования были выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о субсидии № 14.586.21.0059 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58618X0036).

## КОМПОНЕНТЫ ТЕНЗОРА ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ШЕЙКЕ ОБРАЗЦА ТИТАНА ВТ1-00

**А.М. Реков[1], Д.И. Вичужанин[2]**

*[1]Уральский федеральный университет, г, Екатеринбург*

*[2]Институт машиноведения, Уральское отделение РАН, г. Екатеринбург*

arekov@yandex.ru

Методом корреляции цифровых изображений определены компоненты линейных и сдвиговых деформаций в области симметричной шейки плоского образца титана ВТ1-00 при одноосном растяжении. Определены поля векторов смещений участков поверхности образца. В качестве реперных точек принимали неровности микрорельефа, возникающие на поверхности образца. Деформации рассчитывали на линиях, параллельных оси образца. Определена кинетика компонент тензора деформаций и вычислены коэффициенты их взаимной корреляции. Выполнена оценка статистических параметров законов распределения этих компонент.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИМАШ УрО РАН (тема АААА-А18-118020790145-0).

## КОНЕЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ: ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**А.А. Роговой, О.С. Столбова**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

sos@icmm.ru

Представлена модель, описывающая поведение сплавов с памятью формы при конечных деформациях. Сформулирована вариационная постановка связанной задачи. Полученные соотношения использованы для решения краевых задач о накоплении фазовых деформаций в процессе прямого фазового перехода аустенит-мартенсит в предварительно деформированных полых цилиндрах и последующем снятии накопленных деформаций в процессе обратного фазового перехода мартенсит-аустенит. Задачи решались численно методом конечных элементов с применением процедуры пошагового нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-590008.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ВОЛН В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХИЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

**О.В. Садовская, И.В. Смолехо**

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

o_sadov@icm.krasn.ru

Для описания термомеханических процессов в жидких кристаллах применяется математическая модель, в рамках которой жидкокристаллическая среда рассматривается как мелкодисперсная сплошная среда с вращающимися частицами, обладающая упругим сопротивлением деформации объема и вязкоупругим сопротивлением относительному повороту частиц. Учитываются моментные взаимодействия, вызванные термомеханическими возмущениями и воздействием электрических полей. Разработан вычислительный алгоритм для решения краевых задач с начальными данными и граничными условиями общего вида. Алгоритм реализован в виде параллельной программы с применением технологии CUDAдлявычислительныхсистемсграфическимиускорителями.

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОМПОЗИТА ГРАФЕН-НИКЕЛЬ

**Л.Р. Сафина[1], Ю.А. Баимова[1,2]**

*[1]Башкирский государственный университет, Уфа*

*[2]Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

saflia@mail.ru

Композитный материал получаемый путем объединения двух или более материалов очень часто проявляет ряд уникальных свойств, такие как особая деформируемость, высокая прочность и т.д. В нашей работе методом молекулярной динамики было изучено деформационное поведение композита графен-никель с использованиемпростого парного межатомного потенциала Морзе. Было получено, что композит графен-никель достигает большей деформации при заполнении графена более объемными наночастицами Ni.

Работа выполненапри поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД- 1651.2018.2).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДИССИПАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦЕПЯМИ

**Н.В. Севодина, Н.А. Юрлова, Д.А. Ошмарин, М.А. Юрлов**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

natsev@icmm.ru

Традиционно повышение диссипативных свойств конструкций обеспечивается дополнением исходного объекта вязкоупругим слоем. Это же достигается присоединением к конструкции пьезоэлектрических элементов и внешних электрических цепей. Предложена методика формирования электровязкоупругих систем путем комбинации данных подходов. Определение оптимальных параметров вязкоупругих и пьезоэлектрических элементов производится на основе решения задачи о собственных колебаниях электровяз-

коупругих тел с внешними электрическими цепями в связанной постановке с учетом ограничений на массогабаритные и динамические характеристики получаемой системы.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00158-а.

## СТРУКТУРА И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ МАССИВНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА 1570С, ПОДВЕРГНУТЫХ ВСЕСТОРОННЕЙ КОВКЕ С ПОНИЖЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

**О.Ш. Ситдиков, Е.В. Автократова, О.Э. Латыпова, Р.Р. Ильясов, М.В. Маркушев**
*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
sitdikov.oleg@imsp.ru

Изучены структура и механические свойства литого термически неупрочняемого комплексно-легированного сплава Al-5Mg-0,18Mn-0,2Sc-0,08Zr после всесторонней изотермической ковки, проводимойс понижением температуры от 325 до 175°С до суммарной деформации e ≈ 24 и последующего отжига при температурах от 325 до500 °С. Показано, что высокотемпературная всесторонняя ковка является эффективным методом обработки объемных заготовок из данного сплава, в результате чего формируется гомогенная ультрамелкозернистая структура с размером зерен около 1 мкм.Последняя обеспечивает существенное упрочнение сплава, повышение пластичности и достижение достаточно высоких сверхпластических свойств.
Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН(№ АААА-А19-119021390107-8).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ, 3D СЛУЧАЙ

**А.С. Скалиух**
*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*
a.s.skaliukh@gmail.com

С использованием элементов двухуровневой среды и статистических подходов разработана трехмерная математическая модель квазистатических необратимых процессов деформирования и поляризации поликристаллических сегнетоэлектриков - сегнетоэластиков в интенсивных электрических и механических полях. Построены определяющие соотношения для приращений обратимых и необратимых составляющих деформаций и поляризации. Изучен характер зависимости физических модулей от необратимых параметров. Разработанная модель имплантирована в конечно-элементный комплекс ACELAN, позволяющий рассчитывать остаточные поля предварительной поляризации и остаточной поляризации трехмерных тел сложной формы.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00860–а.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ В МЯГКИХ МАГНИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРАХ

**О.В. Столбов, Ю.Л. Райхер**
*ИМСС УрО РАН РАН, Пермь*
sov@icmm.ru

Мягкий магнитный эластомер (ММЭ) – это композит, полимерная матрица которого наполнена намагничивающимися частицами. ММЭ находят применение в разнообразных смарт-устройствах. Функциональность этих материалов обусловлена их способностью изменять свойства под влиянием внешнего магнитного поля. ММЭ в ответ на приложенное поле качественно меняет свое магнитомеханическое поведение. Образец сохраняет остаточные деформации до выключения магнитного поля. После его выключения образец восстанавливает свою первоначальную форму и свойства. Такой эффект называется магнитоиндуцируемой пластичностью. Цель настоящей работы описать этот эффект на мезоуровне с помощью компьютерного моделирования.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-590160.

## ОДНОМЕРНАЯ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

**К.А. Тихомирова**[1]
[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
tikhomirova.k@icmm.ru

Разработана феноменологическая модель деформационного поведения сплавов с памятью формы, основанная на описании взаимосвязи фазовых и структурных деформаций на макроуровне. Введение функции управляющего напряжения, определяющего степень ориентированности каждого мартенситного элемента, позволяет учесть влияние истории нагружения на процессы последующих превращений и описать случаи неоднородного фазового деформирования. Наряду с высокой описательной способностью, модель обладает простотой численной реализации и экспериментальной идентификации параметров. Выполнена экспериментальная проверка модели и ее апробация на решении ряда задач.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-590008.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

**И.О.Фасхеев**[1]

[1]*Институт динамики геосфер РАН, Москва*

fiomsu@mail.ru

Настоящая работа направлена на решение сложной задачи о быстром течении сжимаемой жидкости через твердый пористый каркас из несжимаемого материала с учетом его конечных деформаций. В работе использована современная модель пористых насыщенных сред со сложными внутренними взаимодействиями. Эта модель обобщает классические работы в области поромеханики, учитывая произвольные движения жидкости и конечные деформации твердого скелета.

## ОБ УЧЕТЕ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РАЗРУШЕНИИ РАСТЯГИВАЕМОГО СТЕРЖНЯ, НАХОДЯЩЕГОСЯ В УСЛОВИИ ПОЛЗУЧЕСТИ.

**Л.В. Фомин**[1], **Ю.Г.Басалов**[1], **А.М. Локощенко**[1]

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

fleonid1975@mail.ru

Вопрос влияния коррозионных процессов на обеспечение безопасной эксплуатации материалов и элементов конструкций рассмотрен на базе постановки задачи о длительном разрушении растягиваемого стержня, находящегося в условии ползучести. Для решения задачи разработана механико-математическая модель, включающая модифицированное уравнение диффузии, кинетическое уравнение накопления повреждений и соотношение для параметра химического взаимодействия. Параметры указанной модели определены на базе экспериментальной зависимости толщины коррозионной пленки от времени. Рассматривается многостадийность процесса разрушения коррозионных слоев под действием увеличивающегося эффективного напряжения.

Работа выполнена при поддержке и частичном финансировании гранта РФФИ № 17-08-00210

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА NIALHA ОСНОВЕ ОЦК-РЕШЕТКИ

**А.А. Чаплыгина**[1], **М.Д. Старостенков**[1], **П.А. Чаплыгин**[1]

[1]*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул*

alesya_ch@mail.ru

В работе рассматривается влияние деформации всестороннего сжатия/растяжения на 1-3-5%интерметаллида NiAl в процессе термоциклирования. Показано, что при деформации растяжения ширина петли гистерезиса увеличивается с увеличением процента деформации. Для деформации сжатия ширина петли гистерезиса уменьшается с увеличением процента деформации.Деформация приводит к увеличению значения средней конфигурационной энергии, заметных изменений структурных характеристик не происходит, что не указывает на наличие возможных сверхструктурных перестроек для интерметаллида NiAl эквиатомного состава.

Работа выполнена при поддержке президентского гранта МК-5094.2018.2.

## ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЛАВА $TI_{49,1}NI_{50,9}$ВРАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ

**А.А. Чуракова**[1,2], **Д.В. Гундеров**[1,2]

[1]*Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

churakovaa_a@mail.ru

Проведены исследования механических свойств, скоростной чувствительности и активационного объёма деформации (ΔV) при температурах испытаний от 20 до 400ºС застехиометрического сплава $Ti_{49,1}Ni_{50,9}$ в крупнозернистом (КЗ) с размером аустенитного зерна (D) 50 мкм, в ультрамелкозернистом (УМЗ) после равноканального углового прессования (РКУП) с D = 700 нм и нанокристаллическом (НК) состояниях с размером зерна D = 50 нм. Проведен фрактографический анализ образцов после механических испытаний. Повышение температуры испытаний приводит к смене характера разрушения с квазихрупкого - хрупкого (с неглубокими ямками) при комнатной температуре до вязкого (с наличием четких ямок) при повышенных температурах.

Работа выполнена при поддержке Гранта Республики Башкортостан Российской Федерации для молодых ученых (№28 ГР от 07.03.2019).

## ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНО УПРУГИХ ТЕЛ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ

**Д.Н. Шейдаков**[1]

[1]*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

sheidakov@mail.ru

В рамках модели Гертина–Мердока изучены особенности потери устойчивости упругих тел с поверхностными напряжениями при разных видах простого и комбинированного нагружения.Рассмотрены прямоугольная и круглая плита, круговой стержень и цилиндрическая труба, шар и сферическая оболочка. Численно найдены спектры критических значений параметров нагружения и построены области устойчивости. Установлено, что характер влияния поверхностных напряжений на устойчивость может быть как

стабилизирующим, так и негативным. Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ (гранты 19-01-00719-а, 19-48-230042-р_а) и в рамках реализации Государственного задания ЮНЦ РАН, номер госрегистрации 01201354242.

## МОДЕЛИ РЕЗИНОКОДНОГО СЛОЯ

**С.В. Шешенин, ИкуньДу, П.В. Чистяков**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

sheshenin@mech.math.msu.su

В ударных/медленных процессах нагружения шины можно не учитывать проявление вязкоупругости, но иногда важно учитывать умеренно большие деформации. Для построения модели эффективного материала используется подход, в котором резинокорд заменяется эквивалентным однородным анизотропным гиперупругим материалом. Используются инварианты, соответствующие типу анизотропии. Для описания качения представлено моделирование вязкоупругих свойств. Проведены и обработаны статические и осцилляционные опыты для определения параметров обобщенной модели Максвелла. Разработана методика осреднения. Проведено сравнение с экспериментальными значениями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-01-05887.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИТОВ

**С.В. Шешенин[1], Ф.Б.Киселев[1], Н.Б. Артамонова[1], Д.М. Семенов[1]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

sheshenin@mech.math.msu.su

Представлены результаты численного трехмерного моделирования НДС дисперсного композитаB4C/Al в случае статики и динамики. В статике и в длинноволновом приближении продемонстрировано асимптотическое связывание решений, полученных на микро- и макроуровнях. Сравниваются решения для идеализированной структуры на основе повторяющейся ячейки и структуры имеющей случайное пространственное расположение включений. Для связывания произвольных представительных областей разработан подход на основе перекрытия областей. Изучено влияние формы армирующих частиц и их распределения. Проведена верификация собственной конечно-элементной реализации. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-51-53006.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ И ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

**С.В. Шлычков**

*Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола*

shlychkovsv@volgatech.net

Представленырезультаты экспериментальных и численных исследований, направленных на построение адекватной динамической модели сложных упруго-акустических систем, учитывающих взаимное влияние тонкостенной конструкции и контактирующего с ней акустического объема. Для корректного построения структурной модели спроектировано и изготовлено устройство для определения и уточнения упруго-диссипативных свойств конструкционных материалов.Установлено заметное уменьшение декремента колебаний в результате нанесения специального лакового покрытия и противоположный эффект от содержания поздней древесины. Смоделирована связанная упруго-акустическая система, обнаружены новые устойчивые режимы колебаний.:

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

**Ю.А. Шмидт, О.А. Рогозин**

*Центр проектирования, производственных методов и материалов,*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

Iurii.shmidt@skoltech.ru

Численное моделирование процесса селективного лазерного плавления – сложная многомасштабная задача, возникающая при 3Dпечати. Используя программный пакет OpenFOAM®было проведено численное моделирование тепловой задачи и остаточных напряжений для термоупругопластической задачи. Данное исследование позволит рассчитывать параметры печати, минимизирующие остаточные напряжения, и, как следствие, улучшающие качество произведённой детали.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ЗАДАЧИ О СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ТЕЛ К ПРОБЛЕМЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

**Н.А. Юрлова, Д.А. Ошмарин, М.А. Юрлов, Н.В. Севодина**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

yurlova@icmm.ru

В работе предложен и численно продемонстрирован способ, позволяющий оценить возможность и целесообразность использования одного пьезоэлемента для реализации стратегии управления динамическим поведением электроупругой конструкции в некотором частотном диапазоне. Он включает в себя два этапа: определение места расположения пьезоэлемента на поверхности конструкции и определение параметров внешней электрической цепи, подключаемой к его электродированным поверхностям.Определение оптимальных параметров на каждом этапе основано на решении задачи о собственных колебаниях электроупругих тел с внешними электрическими цепями. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00080-мол_а.

## ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ

**Н.Р. Юсупова[1], Н.Ю. Пархимович[2], А.А. Назаров[2]**

*[1] Башкирский государственный университет, Уфа*

*[2] Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

aanazarov@imsp.ru

Ультразвуковая сварка (УЗС) является эффективным способом твердофазного соединения металлическихлистов. Интерес к исследованию УЗС в последние годы возрос в связи с возможностью ее применения в аддитивных технологиях. В настоящей работе проведены эксперименты по УЗС пластин меди. Два листа меди толщиной 0.5 мм соединялись между собой как непосредственно, так и с использованием прокладки из того же материала с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурами. Проведены механические испытания образцов соединения на срез, исследованы зависимости прочности соединения от наличия и структуры прокладки, от статической нагрузки и времени сварки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10126.

## ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТИПА ЦАРАПИН НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТОНКОСТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА

**С.Н. Якупов [1,2]**

[1]*Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань*

[2]*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань*

tamas_86@mail.ru

Одной из причин разрушения конструкций является наличие поверхностных дефектов. Необходимо грамотно диагностировать состояния элементов конструкций с учетом различных дефектов, в частности царапин. Разработан экспериментально - теоретический метод определения тангенциальной и изгибной жесткости тонкостенных элементов с системой царапин. Приведены результаты исследований, выполнен анализ влияния параметров царапин на жесткостные свойства тонкостенных элементов, построены модели изменения тангенциальной жесткости и жесткости на изгиб. Установлено, что наличие системы поверхностных царапин приводят к снижению тангенциальной и изгибной жесткости тонкостенных образцов.

## СВЯЗАННЫЕ КОЛЕБАНИЯ МОНОКЛИННОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПОЛОСЫ

**Б.А. Ярцев [1]**

[1]*ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург*

boris_yar@mail.ru

Предложена математическая модель затухающих колебаний моноклинной композитной полосы, основанная на теориях обобщенного кручения, балки Тимошенко и принципа упруго-вязкоупругого соответствия. Достоверность модели подтверждена сопоставлением расчетных и экспериментальных значений собственных частот и диссипативных характеристик различно ориентированных к направлению армирования композитных полос. Приведены результаты численных исследований влияния граничных условий и ориентации армирующих волокон на величины собственных частот и коэффициентов механических потерь композитной полосы.

## Подсекция III-8. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ, ИДЕНТИФИКАЦИИ И НАДЕЖНОСТИ

### РОЛЬ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВОЙ ФОРМОВКИ

**С.А. Аксенов[1],А.В.Колесников[2], Михайловская А.В [3]**

[1]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

[2]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск*

[3]*Национальный исследовательский университет «МИСиС», Москва*

saksenov@hse.ru

Работа посвящена исследованию различий между режимами давления, рассчитанными на основе результатов конечно-элементного моделирования процесса формовки с использованием параметров материала, полученных в условиях одноосного и двухосного натяжения. Произведен анализ экспериментальных данных, показавший различие реологических характеристик алюминиевого сплава АМг6, полученных путем испытаний образцов на одноосное растяжение и испытаний по формовке образцов в цилиндрическую матрицу. Исследовано влияние, которое эти различия могут оказать на проектирование технологий газовой формовки.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

### ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАЧАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО СЛОЯ В ЗАДАЧАХ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ ОБШИВКИ КРЫЛА

**К.А. Балунов[1, 2], В.В. Чедрик [1]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

kirill.balunov@gmail.com

В статье обсуждаются аспекты аэропрочностной оптимизации силовой конструкции крыла гражданского среднемагистрального самолёта, в которой панели обшивки концевой части крыла выполнены из композиционного материала. В рамках параметрических расчётов произведена оценка влияния ориентации несбалансированного слоя и его процентной доли в композитном пакете на аэроупругие и прочностные характеристики крыла. Даны предварительные результаты по определению оптимального аэроупругого раскроя панелей обшивки концевой части крыла.

### АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРОДОЛЬНО ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ

**Н.В. Баничук, С.Ю. Иванова, Е.В. Макеев, А.В. Синицын**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

banichuk@gmail.com

Представлена математическая модель, описывающая поперечные колебания и явление термоупругой неустойчивости, возникающей при определенных критических температурах и скоростях продольного движения слоистой пластины. С целью оптимизации термоупругой устойчивости разыскиваются различные комбинации слоев из заданных материалов, доставляющие максимальное значение критической температуре или транспортной скорости. Проводится осреднение термомеханических свойств полотна, и отыскание наилучшей слоистой структуры сводится к численному решению многопараметрической задачи оптимизации устойчивости эффективно однородной пластины.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01247

### АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА САЙЛЕНТБЛОКА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

**В.В. Богданов[1], И.В. Леонтьев [2]**

[1]*Московское высшее общевойсковое командное училище, Москва*

[2]*ООО «РС Групп», Сергиев-Посад*

bogdanov@vtulka.ru

Изложены наиболее оптимальные варианты повышения ресурса серийного сайлентблока транспортного средства. Приведены мотивация, соответствующие ей расчёты и предложена новая запатентованная в РФ конструкция упругого полиуретанометаллического шарнира. На основе численных расчётов МКЭ и анализа полученных полей распределения напряжений и деформаций для предложенной конструкции сайлентблока, а также результатов натурных испытаний прототипа сделан вывод о надёжности этого элемента подвески и потенциальных возможностях дальнейшего повышения ресурса.

## РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

**С.С. Гаврюшин, С.М. Ганыш**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

gss@bmstu.ru

Излагается теоретическое обоснование, математическая модель, алгоритм численного анализа и прикладная программа, предназначенная для исследования процесса деформирования стержневых элементов конструкций, изготовленных из сплавов с памятью формы, при больших перемещениях. Задача сводится к решению краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений. Возможности программы иллюстрируются рядом примеров.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 2.7918.2017/8.9

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ИЗГИБА ТРУБОПРОВОДА

**А.И. Демин [1], Э.Р. Ибрагимов [1], Е.А. Покровская [1], А.Л. Федотов [1], Д.С. Лисовенко [2]**

[1]*ООО «НИИ Транснефть», Москва*

[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

deminaliv@gmail.com

Описана проблема оценки технического состояния магистральных трубопроводов при эксплуатации. Разработана методика оценки текущего и прогнозного технического состояния трубопровода на основании данных внутритрубной диагностики с применением инерционных навигационных систем. Методика основана на классификации, кластеризации и регрессионном анализе массива данных результатов диагностики. Для формирования признаков применяются аналитическое решение для изгибных напряжений и численные расчеты с применением метода конечных элементов.

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАЗЦА ДВУОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ ЖЕСТКОСТИ

**А.В. Жидков, В.Г. Киселев, А.К. Любимов, О.А. Сергеев**

*Институт информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

*kiselev@mech.unn.ru*

С использованием подходов топологической оптимизации, рассматривается задача обоснования конфигурации плоского экспериментального образца, в рабочей области которого реализуется двуосное напряженно-деформированное состояние. Изложена методика и приведены примеры.

## ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ

**Р.Р. Кабиров [1], Р.Р. Мулюков [1,2], А.Х.Нурисламов [1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

Kabirovr@imsp.ru

В работе представлены результаты исследования влияния деформационно-термической обработки на механические свойства и магнитные характеристики мартенситно-стареющей стали, легированного вольфрамом. Методами металлографических и рентгеноструктурных исследований и изучения механических и магнитных свойств показано, что высокий уровень свойств, достигаемый в этих сталях связан с выделением мелкодисперсных интерметаллидных фаз и выделений частиц аустенита в процессе обратного мартенситного превращения, как в ходе холодной пластической деформации, так и при последующем старении. Полученный комплекс свойств позволяют рекомендовать применение стали в качестве материала для изготовления роторов высокоскоростных гистерезисных двигателей.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310213-0.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ГОФРИРОВКИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МЕМБРАНЫ, ИСПЫТЫВАЮЩЕЙ КОНЕЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

**М.И. Карякин, Ю.А. Устинов**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

karyakin@sfedu.ru

В работе рассматривается ряд задач о деформировании осесимметричных гофрированных мембран с жестко защемленным краем под действием гидростатического давления. Для моделирования упругого поведения мембраны используются нелинейные уравнения, основанные на гипотезах Кирхгофа-Лява. Представлено решение задачи поиска оптимальной гофрировки профиля мембраны. Критерием оптимальности является протяженность линейного участка на графике зависимости объема под поверхностью мембраны от приложенного давления. В качестве оптимизационного метода использован модифицированный генетический алгоритм. Проанализированы профили найденных мембран и перспективы их применения в реальных датчиках давления.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ

**Н.А. Кошелева [1], А.А. Воронков [2], Г.С. Сероваев [1], В.П. Матвеенко [1], И.Н. Шардаков [1]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

kosheleva.n@icmm.ru

Наличие остаточных технологических деформаций является одной из характерных особенностей для полимерных композиционных материалов (ПКМ) и бетонов. Традиционные методы регистрации и оценки остаточных деформаций трудоемки, длительны и требуют большого объема измерительных работ с применением специального оборудования. Концепция использования встроенных волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД) открывает перспективы измерения остаточных деформаций. Возможность использования встроенных ВОДД была реализована на примере образцов из ПКМ и бетона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-590684 р_урал_а.

## РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ И ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ ВНУТРИ ЛОПАСТИ

**И.П. Кузнецов, А.С. Немов, А.Д. Новокшенов**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

iggamanmail@gmail.com

В данной работе представлено описание и особенности реализации двух методов оптимизации стержневых структур. Метод критерия оптимальности для минимизации податливости и генетический алгоритм для минимизации массы стержневой системы. Приведены результаты решения задачи оптимизации стержневой системы внутри лопасти этими методами.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ МЕТАЛЛА

**К.В. Кукуджанов**

*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*

kconstantin@mail.ru

Рассматриваются процессы эволюции дефектов структуры (микротрещин, микропор, двойников) и зерен поликристаллического металла при обработке образцов кратковременными импульсами высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП). Исследование осуществляется численно на основе электро-термо-упруго-пластической модели воздействия ВЭМП на предварительно поврежденный материал с системой дефектов. Модель учитывает фазовые превращения и другие значимые физические явления при исследуемом воздействии. Изучаются зависимости изменения поврежденности и электропроводности металла от параметров импульсов ВЭМП.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00958.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОДЕФЕКТЫ В МЕТАЛЛЕ

**К.В. Кукуджанов, А.В. Ченцов, А.Л. Левитин**

*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*

kconstantin@mail.ru

Экспериментально изучаются процессы эволюции дефектов структуры (микротрещин, микропор, двойников) и зерен поликристаллического цинка, при обработке образцов кратковременными импульсами высокоэнергетического электромагнитного поля (ВЭМП). Исследование осуществляется с помощью установки, созданной в лаборатории механики технологических процессов ИПМех РАН, позволяющей осуществлять воздействие периодическими импульсами ВЭМП на предварительно растянутые (до значений близких к предельной пластической деформации до разрушения) стандартные образцы.Исследование шлифов, проведенное с помощью сканирующего электронного микроскопа показало, что под действием ВЭМП в цинке происходит уменьшение поврежденности в следствие залечивания микродефектов, а также локальная рекристаллизация с уменьшением размера зерна. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00958.

## РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**Б.А. Люкшин [1,2,3], С.А. Бочкарева [1,2], С.В. Панин [1,4], Н.Ю. Гришаева [1,2], И.Л. Панов [1, 2], Д.Г. Буслович [1,4]**

[1]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,*

[2]*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск*

[3]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

[4]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

svp@ispms.tsc.ru

Работа посвящена созданию многокомпонентной композиции с заданными механическими и триботехническими характеристиками на основе сверхвысокомолекулярного с использованием экспериментально-теоретического способа. Ограниченный объем экс-

периментальных данных полиэтилена о зависимости требуемых эффективных свойств от рецептуры дополняется расчетными значениями, получаемыми на основе интерполяционного полинома Лагранжа. Полученные зависимости изображаются в виде поверхностей и соответствующих им изолиний. Наложение поверхностей позволяет определить область, отвечающую заданным требованиям и получить для нее рецептуру. По полученной рецептуре были изготовлены и испытаны образцы, результаты испытаний показали, что они удовлетворяют заданным требованиям. Работа выполнена при поддержке ПФИ ГАН на 2013-2020 годы по направлению фундаментальных исследований III.23, а также проекта РФФИ № 14-08-90028 Бел_а.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ 3D МОДЕЛЕЙ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Е. А. Мальцев, А.А. Пасько, Д.Д. Попов, С.С.Чугунов, И.Ш.Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов, Сколковский институт науки и технологий, Москва*

evgenii.maltsev@gmail.com

В данной работе описывается использование функционального представления геометрии объекта в 3D печати для моделирования регулярных решеток, ячеистых структур и нерегулярных пористых образований, используемых в топологической оптимизации. Обсуждается полигональное и граничное представление объектов. Рассматриваются специальные алгоритмы получения мельчайших деталей объектов, заданных в неявном виде - это позволяет с высокой точностью конструировать ячеистые структуры сложной топологии. Данный подход был применен для моделирования и изготовления изделий, имеющих сложную геометрию, методом 3Dпечати. Представлены результаты механических испытаний изделий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ОБОСНОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ

**В.П. Матвеенко [1], Г.С. Сероваев[1], Н.А. Кошелева [2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

serovaev@*icmm*.ru

В настоящей работе проведено численное исследование НДС в окрестности встроенного в композитный материал оптического волокна при разных схемах нагружения. Показано, что наиболее опасной является нагрузка в плоскости, перпендикулярной оптическому волокну. Установлено, что изменение геометрии смоляного кармана не имеет существенного влияния на концентрацию напряжений в окрестности оптического волокна. Установлены границы применимости формулы взаимосвязи изменения длины волны брэгговской решетки с деформацией волокна. Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00243).

## ЧИСЛЕННОЕ ГАШЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ КРУГЛОЙ УПРУГОЙ МЕМБРАНЫ С ПОМОЩЬЮ ТОЧЕЧНОГО АКТЬЮАТОРА

**И.Е. Михайлов**

*Федеральныйисследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва*

mikh_igor@mail.ru

Рассматривается задача численного гашения колебаний круглой упругой мембраны с помощью точечного актьюатора. Математическая модель колебания круглой мембраны представляет собой начально-краевую задачу для неоднородного волнового уравнения. Разработан вычислительный алгоритм на основе решения конечно-разностных уравнений, аппроксимирующих исходное со вторым порядком. Решение задачи гашения колебаний сводится к поиску минимума функции многих переменных, и для нахождения этого минимума используется метод координатного спуска.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ № 17-19-01247.

## ЧИСЛЕНЫЙ РАСЧЁТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ ЛОКАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ

**В.Н. Нгуен[1], С.А. Туктаров [2], В.В. Чедрик [1, 2]**

[1]*Московский физико-технический институт* (*национальный исследовательский университет*), *Долгопрудный*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*

chedrik@tsagi.ru

Проведены исследования напряжённо-деформированного состояния и оптимизация силовых элементов конструкции с выраженной неравномерностью распределения напряжений, обусловленной наличием концентраторов и рёбер жёсткости. Рассмотрены вопросы моделирования таких конструкций с применением метода конечных элементов и упрощённых балочных моделей. Проведены параметрические исследования с использованием различных математических моделей и сеток различной подробности. Проанализированы возможные методы оптимизации конструкции с локальным распределением напряжений и описаны численные результаты оптимизации для ряда тестовых примеров.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ДИСКОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

**Ю.В. Немировский**

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

nemiryury@mail.ru

При использовании в качестве допустимого критерия эксплуатации фазовых материалов для всех материалов, составляющих композитную конструкцию деформационный критерий предельной упругой деформации или деформации предразрушения, предположение о несжимаемости и принцип слабейшего звена, разработан единый подход к поиску законов перераспределения материалов в конструкциях широкой и разнообразной номенклатуры: радиально-слоистых дисков с упрочняющимися и защитными слоями, поперечно-слоистых и комбинированных дисков их изотропных материалов, слоисто-армированных дисков. Получен целый ряд новых аналитических решений, позволяющих анализировать существенное влияние изменения структур, обеспечивающих повышение жесткостных и понижение весовых характеристик искомых рациональных проектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-01-00038.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ В СРЕДЕ

**К.Ю. Осипенко**[1,2]

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

[2]*Московский государственный строительный университет, Москва*

kirill-o@mail.ru

На основе метода локального взаимодействия исследуется асимптотическая устойчивость прямолинейного движения тела в сопротивляющейся среде при малых начальных возмущениях. В случае квадратичной зависимости контактного давления от нормальной составляющей скорости сравниваются критерии устойчивости прямолинейного движения правильной треугольной пирамиды, кругового конуса и параболоида вращения.

Работа выполнена по теме Госзадания (номер госрегистрации АААА-А17-117021310380-1) и при частичной финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект №17-08-00775а).

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ

**В.Н.Паймушин [1,2], Р.А.Каюмов[1,3], С.А.Холмогоров [1]**

[1]*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань*

[2]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

[3]*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань*

pajmushin@mail.ru

Изучены некоторые особенности поведения композиционного материала при циклической нагрузке. Предложен метод последовательной идентификации параметров ядра ползучести, соотношений теории упрочнения и нелинейной упругости по результатам анализа данных экспериментов на циклическое нагружение. Для этого использованы соотношения, основанные на гипотезе о том, что при больших временах скорость деформаций ползучести намного меньше скорости наследственно упругих деформаций. Метод проиллюстрирован на примере обработки данных реальных экспериментов, проведенных авторами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 9.5762.2017/ВУ (проект № 9.1395.2017/ПЧ), и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00349).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ И ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ FREPМОДЕЛЕЙ

**Д.Д. Попов, Е.А. Мальцев, А.А. Пасько, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов, Сколковский институт науки и технологий, Москва*

dmitry.popov@skoltech.ru

Доклад посвящён вопросам оптимизации формы и топологической оптимизации моделей, основанных на функциональном представлении (FRep). Кратко изложены основные принципы моделирования в рамках FRep. Представлены и классифицированы классические подходы к оптимизации, применяющиеся в настоящее время. Описаны способы построения целевых функций для оптимизационных задач, решатели применимые к FRepмоделям. Приводятся преимущества и недостатки использования FRepдля решения оптимизационных задач. Также приведены примеры проведённой оптимизации нескольких моделей по критерию максимизации жесткости твердого тела. В заключении описаны направления дальнейших исследований по теме доклада.

## ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**А.Г. Ришняк, С.А. Люшнин**

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва*

rishnyak@mail.ru

Предложен новый оригинальный подход к вероятностному анализу стохастических систем в интерпретирующей объектно-ориентированной среде, разработанной средствами MATLAB. Показана целесообразность применения данного подхода к анализу надежности технических устройств. Представлена объектно-ориентированная методика вероятностного анализа событий, связанных с пуассоновскими потоками отказов, заявок, сигналов, позволяющая получать точные решения разнообразных задач надежности сложных систем с использованием разработанных классов случайных величин.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**А.Р. Сафиуллин, Р.В.Сафиуллин**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

d12art@mail.ru

В работе описаны результаты компьютерного моделирования диффузионной сварки и сверхпластической формовки (СПФ) многослойных полых гофровых конструкций из титанового сплава ВТ6. Проведено сравнение способов нагружения при моделировании диффузионной сварки. При моделировании СПФ сравнивались трехслойные конструкций двух типов, отличающихся напряженно-деформированным состоянием. На основании полученных результатов численного моделирования разработан рациональный режим СПФ, обеспечивающий деформирование ребер жесткости в условиях сверхпластичности (СП) и сокращение времени формовки трехслойной конструкции.

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЧНОСТИ АДАПТИВНЫХ АВИАКОНСТРУКЦИЙ

**В.Н. Семенов [1,2], И.В. Волков [2]**

*[1]ФГУП " Центральный аэрогидродинамический институт"*

*[2]Московский физико-технический институт. Факультет аэромеханики и летательной техники. (г. Жуковский)*

semenov_vlanik@mail.ru, volkoviv39@mail.ru

В лаборатории прочности и прикладной механики ФАЛТ МФТИ ведутся исследования по актуальным направлением развития авиации, направленным на создание летательных аппаратов (ЛА), адаптируемых к режиму полета. Формируются лабораторные работы для студентов по курсу Основы прочности. Работы касаются новых форм замкнутых систем крыльев ЛА с криволинейными упругими осями, использования сплавов с памятью формы в качестве приводов и силовых элементов, новых подходов к использованию спекл-голографии для уточненного анализа местного напряженно-деформированного состояния в сложных стыках и конфигурациях подконструкций.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ В ТЕЛАХ С ПОКРЫТИЯМИ И ОЦЕНКА ИХ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

**А.Н. Соловьев[1,2], Б.В. Соболь [1], П.В. Васильев [1], Е.В. Рашидова [1]**

[1]*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

[2]*Институт математики, механики и компьютерных наук ЮФУ, Ростов-на-Дону*

solovievarc@gmail.com

В работе рассматривается цикл задач о концентрации напряжений в окрестности вершин внутренней трещины в полосе, усиленной покрытием, в бесконечном упругом клине, также усиленном покрытием, внутри стенки кольца, усиленного внешним покрытием. Применяется совокупность методов неразрушающего контроля и технологий искусственных нейронных сетей для проведения идентификации дефектов. Применяется метод обобщённых интегральных преобразований, который позволяет перейти к решению сингулярного интегрального уравнения. Для каждого случая, получены значения коэффициента фактора влияния, в окрестности вершин трещин для различных комбинаций геометрических и физических параметров задачи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проектов 19-08-0074 и 18-31-00024.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЬЕЗОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ: ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**А.Н. Соловьев[1,2], П.А. Оганесян [2]**

[1]*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

[2]*Институт математики, механики и компьютерных наук ЮФУ, Ростов-на-Дону*

solovievarc@gmail.com

В работе рассматриваются методы моделирования пьезоактивных элементов устройств накопления энергии на основе двух подходов: прикладной теории и конечно-элементного моделирования. Исследуется эффективность преобразователя с блочно-

неоднородной поляризацией и проводится сравнение результатов, полученных на основании прикладной теории на основе определяющих соотношений и вариационного принципа. Полученные модели анализируются для разных комбинаций геометрических параметров преобразователя.
Работа выполнена в рамках проекта 9.1001.2017/ПЧ.

## ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ И РАЗМЕРОВ КОНСТРУКЦИИ С УЧЁТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПО ПРОЧНОСТИ И ЖЁСТКОСТИ

**С.А. Туктаров, В.В. Чедрик**
*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский*
tuktarovSA@mail.ru

Статья посвящена разработке нового подхода к топологической оптимизации, в которой прочность и жёсткость рассматриваются одновременно. Предложено два алгоритма топологической оптимизации. Первый алгоритм – для глобальной модели конструкции, второй – для локальных зон, в которых необходимо снизить уровень концентрации напряжений. Предложенный метод демонстрируется на примерах L-образного кронштейна и крыла самолёта.

## ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

**В.А. Фирсов [1], В.М. Шишкин [2]**
[1]*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Казань*
[2]*Вятский государственный университет, Киров*
vafirsov_49@mail.ru

Обсуждается эффективность применения классических способов поверхностного демпфирования изгибных колебаний тонкостенных конструкций. Предложен комбинированный вариант демпфирующего покрытия, позволяющий интегрировать положительные качества вышеуказанных способов. С использованием метода свободных затухающих колебаний получено экспериментальное подтверждение преимуществ предложенного способа демпфирования. Отмечено влияние сопротивления воздуха на демпфирование колебаний. Выявлены особенности НДС предложенного комбинированного покрытия при свободных колебаниях для качественного описания его вязкоупругого поведения.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00058.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА

**В.Э. Цой, О.А. Бабин, А.И. Смирнов**
*Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва*
v_tsoi@mail.ru

В работе рассматривается пространственный криволинейный стержневой конечный элемент при совместном учете растяжения-сжатия, кручения, изгиба для решения задач статики и динамики конструкций. Для такого элемента получены матрицы жесткости и инерции. Матрица жесткости получена из уравнений равновесия бесконечно малого криволинейного элемента, а матрица инерции из энергетических соображений.

## ДИВЕРГЕНЦИЯ ЦАЛЛИСА ПОРЯДКА ½ В ЗАДАЧАХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**К.Р. Чернышев**
*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*
myau@ipu.ru

В рамках теоретико-информационного подхода к идентификации систем на основе свойств дивергенции Цаллиса и расстояния Хеллингера для пары вероятностных распределений введено понятие дивергенции и соответствующей ей взаимной информации Хеллингера-Цаллиса для применения в задачах статистической линеаризации. При этом введенная мера используются двояким образом: как взаимная информация, мера зависимости случайных векторов, – в качестве критерия статистической линеаризации многомерных стохастических систем, а как мера дивергенции вероятностных распределений – в качестве анизотропийной нормы входного процесса, количественно характеризующей собственно соответствие наблюдаемых данных предположениям исходной постановки задачи.

## Подсекция III-9. ПРОБЛЕМЫ МЕЗО И НАНОМЕХАНИКИ

### Room Temperature Superplaticity and Superplastic Forming in Ultrafine Grained Materials: Mechanisms and Mechanics

**Gencaga Purcek [1], Muhammet Demirtas [2]**

[1]*Department of Mechanical Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon 61080, Turkey*

[2]*Department of Mechanical Engineering, Recep Tayyip Erdogan University, Rize 53100, Turkey*

purcek@ktu.edu.tr

Superplasticity, known as the high tensile elongations attained in some fine/ultra-fine grained (UFG) polycrystalline materials, is generally achieved at high temperatures and at very low strain rates. On the other hand, it is well known that high amount of grain refinement results in superplasticity at low temperatures and high strain rates. Furthermore, recent studies showed that decreasing grain size of some classes of alloys down to sub-micron levels and modification of grain boundaries via severe plastic deformation (SPD) methods bring about superplastic behavior in these alloys even at room temperature. This paper gives a summary about the studies on RT superplasticity in some specific alloys after UFG formation, its mechanism and mechanic.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МУЛЬТИ-ШАГОВОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ В ТЕОРИИ МОРИ-ТАНАКА-БЕНВЕНИШТЕ

**С.Г. Абаимов, А. Трофимов, И.В. Сергеичев, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов,*

*Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва*

s.abaimov@skoltech.ru

Необходимость использования мультишаговой схемы гомогенизации гетерогенных материалов возникает постоянно, зачастую даже без намерения исследователя. Причиной является невозможность учесть за один шаг всю сложную микроструктуру, от макроуровня до нано-уровня, что требует введения процедуры декомпозиции и использования эффективных свойств в микромеханической схеме, разработанной для гомогенных составляющих. В нашем исследовании мы проводим сравнение одно-, двух- и мультишаговой процедур в теории Мори-Танака-Бенвениште для примеров двух- и трех-фазных композитов.

### СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ПРИ КОНТАКТЕ С НАНО-ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Т.Ф. Аслямов, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов,*

*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

t.aslyamov@skoltech.ru

Информация о наномасштабном распределении флюида на границе раздела с твердой фазой имеет широкое применение для характеризации пористых материалов, создании фильтрационных устройств и суперконденсаторов. Одним из самых популярных методов описания таких неоднородных систем является Теория Функционала Плотности (DFT). Несмотря на свою долгую историю, большинство версий DFT применимо только при условии идеально гладкой твердой поверхности. В данном докладе будут обсуждаться новые результаты расширения метода DFT на случай неидеальных нано-шероховатых поверхностей. Разработанная теория позволяет описать экспериментальные измерения и предсказать геометрию шероховатой поверхности.

### ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ПОДЛОЖКЕИ ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РОСТ БАКТЕРИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК

**А.Ю. Беляев[1], И.А. Морозов[1], А.С. Каменецких[2], Л.М. Лемкина[3]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург*

[3]*Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь*

belyaev@icmm.ru

Одним из способов улучшения характеристик поверхности полимерного материала является плазменная обработка. Деформации, возникающие при эксплуатации изделий из мягких упругих полимеров, могут привести к нежелательному повреждению созданного покрытия.В работе исследовано влияние одноосной нагрузки (амплитуда деформации 40%) на поверхность мягкого полиуретана, обработанного плазменной иммерсионной имплантацией ионов азота с энергией 1 или 3 кэВ.В результате обработки изменяются рельеф и гидрофобность поверхности, что ведет к снижению адгезии как грамположительных (стафилококк), так и грамотрицательных (кишечная палочка) бактерий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-48-590057_р_а.

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

**А.А. Белкина[1], М.М. Абрамова[1], Н.А. Еникеев[1]**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

anya.belkina0021@mail.ru

В настоящее время исследователи в области механики деформируемого твёрдого тела и физики металлов проявляют значительный интерес к ультрамелкозернистым (УМЗ) материалам, полученным методами интенсивной пластической деформации (ИПД), которые демонстрируют улучшенные механические и функциональные свойства. Актуальным является исследование влияния ИПД на механическое поведение конструкционных материалов, таких как нержавеющие стали. В данной работе представлены результаты по исследованию влияния ИПД кручением на структуру и прочность стали 316. Показано, что вариация температуры ИПД позволяет получать различные УМЗ структуры, обеспечивающие высокопрочное состояние с приемлемой пластичностью.

## ПРОЯВЛЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ В ВЫСОКОПРОЧНОМ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СПЛАВЕ 7XXX

**Е.В. Бобрук[1,2], М.Ю. Мурашкин[1,2]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

e-bobruk@yandex.ru

Исследование нацелено на достижение высоких значений низкотемпературной пластичности при сохранении повышенной механической прочности в УМЗ высокопрочном алюминиевом сплаве 7XXX. УМЗ структура с наименьшим размером зерен формируются путем обработки ИПДК.Установлено, что после ИПДК и дополнительного отжига в интервале температур 80… 200 °C твердость материала изменяется незначительно. Максимальные удлинения при температуре 170 °C достигаются 500%, при 200 °C – 700%.

Данные исследования были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения о субсидии №14.586.21.0061 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58618X0061).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА И НАПОЛНИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ

**Т.А. Брусенцева, В.М. Фомин**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Brusentseva@itam.nsc.ru

Рассмотрен гетерогенный материал как трехфазный, то есть состоящий из матрицы, наполнителя и межфазного слоя, окружающего каждое из включений. Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований физико-механических характеристик гетерогенного материала на основе эпоксидной смолы и нанонаполнителей. Построена модель зависимости модуля упругости полимерного композита от концентрации наполнителя с учетом характеристик межфазного слоя. Для эпоксидной смолы DER-330 и нанопорошка диоксида кремния А-380 радиусом 7 нм вычислена толщина межфазного слоя. Показано, что при концентрации 1.2 % модули упругости композита и межфазного слоя достигают максимума.

Работа (частично) выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610134-9).

## АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ХИРАЛЬНЫХ НАНОТРУБОК

**И.А. Брюханов[1], В.А. Городцов[2], Д.С. Лисовенко[2]**

[1]*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

ibryukhanov@gmail.com

Исследуются особенности одноосной деформации нанотрубок, образованных скручиванием тонких пластин [010] из кристаллов железа и меди. В результате атомистических расчетов было обнаружено, что такие нанотрубки могут иметь отрицательный и положительный коэффициент Пуассона при растяжении (сжатии) в зависимости от угла хиральности. Эти нанотрубки также проявляют связь между закручиванием и одноосной деформацией с максимальным эффектом при хиральном угле, близком к 25°. Показано, что теория упругости анизотропного тела также позволяет оценить углы хиральности, при которых нанотрубки начинают проявлять ауксетические свойства и эффект Пойнтинга.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-10270.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА С УГЛЕРОДНЫМ НАНОНАПОЛНИТЕЛЕМ

**Х.А. Батт, С.Г.Абаимов, С.В. Ломов, И.Ш. Ахатов**

*Центр проектирования, производственных технологий и материалов, Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва*

hassaan.butt@skoltech.ru

Проведен экспериментальный анализ возможности самоконтроля композитов на основе полимерной матрицыс углеродными нанодобавками. Одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, графен, химически модифицированный графен и восстановленный оксид графена добавляли к бис-а-фенольной матрице с массовым процентным содержанием 0,5, 1,0 и 2,0% посредством комбинации механического перемешивания и обработки ультразвуком. Затем образцы были испытаны на электрическую проводимость как в отсутствие нагрузки, так и при растягивающей нагрузке. Исследована зависимость проводимостиот нагрузки и проведен анализ свойств.

## НЕДАВНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАДОКСА СВЕРХПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ В НАНОМАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ИПД

**Р.З. Валиев[1,2], И.В. Смирнов[2], А.Д. Евстифеев[2]**

[1]*Институт физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

ruslan.valiev@ugatu.su

Аннотация. Формирование ультрамелкозернистых (УМЗ) структур с размерами зерен в субмикронном (<1 мкм) или нанометровом (<100 нм) диапазоне в металлических материалах обычно повышает их прочность, но, как правило, приводит к снижению пластичности. В настоящей работе показана возможность достижения одновременно необычайно высокой прочности и повышенной пластичности в УМЗ металлах и сплавах, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), которые позволяют не только «управлять» размерами зерен, но также и формировать различные наноструктурные элементы, включая наночастицы, нанодвойники и зернограничные состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта СПбГУ, мероприятие 3 (id 26130576).

## РАСТЯЖЕНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ИЗ РАЗЛИЧНЫМ ОБРАЗОМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ И КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

**М.А. Волков, В.А. Городцов, Д.С. Лисовенко**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

volkovmikhl@gmail.com

Проведен анализ растяжения двухслойных пластин из гексагональных и кубических кристаллов с различной ориентацией слоев. Получены зависимости эффективного модуля Юнга и коэффициентов Пуассона пластины от упругих постоянных исходных кристаллов, отношения толщин слоев и угла между кристаллографическими системами координат двух слоев. Проведен анализ изменчивости эффективных характеристик пластин, определены их экстремальные значения. Установлено, что эффективные модуль Юнга и коэффициенты Пуассона пластины могут существенно отклоняться от значений, предсказанных по правилу смесей. Модуль Юнга некоторых пластин превосходит значения модуля Юнга наиболее жесткого слоя.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-79-10270.

## РАВНОВЕСИЕ НЕЛИНЕЙНО УПРУГОГО ШАРА С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ДИСЛОКАЦИЯМИ

**Е.В. Головешкина**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

evgeniya.goloveshkina@yandex.ru

Решена задача континуальной теории дислокаций о больших деформациях упругого полого шара со сферически симметричным распределением дислокаций. Исследованы собственные напряжения и взаимодействие дислокаций с гидростатическим давлением. Построено решениенелинейной краевой задачи для изотропного материала общего вида при произвольном сферически симметричном распределении дислокаций. Для полулинейного материала припроизвольнойплотности краевых дислокаций и несжимаемого материала в случае винтовых дислокаций радиального направления получены точные решения.Для класса несжимаемых изотропных материалов при специальном распределении винтовых и краевых дислокаций найдено универсальное решение.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ НАНОСТРУКТУРЫ НА ПРОЦЕСС ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

**Е.И. Головнева[1], И.Ф. Головнев[1], А.В. Уткин[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск*

elena@itam.nsc.ru

С помощью метода молекулярной динамики изучено влияния размера наностержня на поглощение энергии при циклической нагрузке, которая задается через смещение крайней плоскости атомов, моделирующей подвижный зажим. В большем наностержне качественно выполняются все закономерности, выявленные для меньшего наностержня. Т.о. изучать новые подходы к моделирова-

нию различных механических воздействий; выявлять общие закономерности поведения наноразмерного образца оптимальнее на меньшей системе. Т.к. это дает экономию по времени расчета и объему вычислительной памяти. Отработанную методику, полученные новые выводы можно применять к расчету этих же характеристик в наноразмерных образцах большего размера. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00068-а.

## ТРЕХУРОВНЕВАЯ ДИСКРЕТНО - КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПРЕРЫВИСТОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

**Д.С. Грибов, Ф.С. Попов,И.Ю. Зубко, Е.А.Чечулина**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

*tpv@matmod.pstu.ac.ru*

Для исследования эффекта прерывистой пластичности предлагается модификация 3-хуровневой упруговязкопластической модели. В модели описывается эволюция плотностей дислокаций на системах скольжения, включаязарождение и аннигиляцию дислокаций. Пластические деформации описываются с использованием уравнения Орована в скоростях. Прерывистость кривой напряжения – деформации предполагается описать путём учёта взаимодействия атомов примеси с дислокациями; предложены соотношения для описания процесса захвата и потери атомов примеси краевыми дислокациями. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00379-а, РФФИ 17-41-590694–р_а.

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК НАНОКОМПОЗИТА: ПОСТРОЕНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ, ЭФФЕКТИВНОЕ КЭ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С АНАЛИТИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

**Н.А. Гудков, С.Г. Абаимов, С.В. Ломов, И.Ш. Ахатов**

*Центр Проектирования, Производственных Технологий и Материалов, Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва*

nikita.gudkov@skoltech.ru

Цифровой двойник нанокомпозита, состоящего из углеродных нанотрубок (УНТ) в полимерной матрице, основан на заданных геометрических свойствах наноармирования: случайном распределении ориентации, длины и искривлённости УНТ и равномерности распределения УНТ или их агломерации в полимере. Для получения механических свойств нанокомпозита представительный элемент объема моделируется с помощью метода конечных элементов (КЭ) и с использованием техники внедренных (embedded) элементов. В результате рассчитываются (1) гомогенизированные свойства, (2) локальное напряжённо-деформированное состояние нанокомпозита. Проведено параметрические исследование зависимости механических свойств нанокомпозита от параметров наноармирования. КЭ моделирование позволяет оценить пределы применимости аналитических моделей нанокомпозита (ориентационное осреднение, метод Мори-Танака и др.).

## НОВАЯ ГИПОТЕЗА ФОРМИРОВАНИЯ СЕТКИ НАПОЛНИТЕЛЯ В ЭЛАСТОМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ

**А.Ю. Елисеева[1], А.В. Кондюрин[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Школа физики университета Сиднея, Австралия*

anastasia_elis@mail.ru

В работе рассматриваются широко применяющиеся в шинной промышленности эластомеры, наполненные частицами технического углерода. Особую роль в формировании механического поведения материала играют явления вблизи поверхности частиц наполнителя. В работе предложена гипотеза формирования вблизи частиц областей с высокой зашитостью эластомерной сетки. Рассмотрены химические реакции, приводящие к росту зашитости полимерного материала. Данная гипотеза объясняет зависимость механических свойств материала от особенностей строения частиц наполнителя (от количества сколов и поверхностно активных веществ). Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-08-00725.

## ЛИНЕЙНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИИ КВАЗИТВЕРДЫХ СОСТОЯНИЙ МИКРОПОЛЯРНЫХ УПРУГИХ ТЕЛ

**А.А. Зеленина[1], Л.М. Зубов[2]**

[1]*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону*

[2]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

a.zelenina@gmail.com

Изучаются такие состояния равновесия упругого микрополярного тела, в которых существуют только моментные напряжения, а силовые напряжения тождественно равны нулю. Эти состояния называются квазитвердыми, поскольку в них каждый элементарный объем среды ведет себя как абсолютно твердое тело, а поле вращений неоднородно. Показано, что квазитвердое состояние реализуется только при наличии распределенных дислокаций. Сформулирована краевая задача о равновесии среды в условиях квазитвердого состояния. Найден ряд точных решений этой задачи как в линейной, так и в нелинейной постановках. Полученные решения могут быть полезными для экспериментального определения моментных постоянных микрополярных сред.

## РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОИНДЕНТОРА С ЭЛАСТОМЕРНЫМ МАТЕРИАЛОМ

**Р.И. Изюмов[1,2], А.Ю. Беляев[1,2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

izumov@icmm.ru

В работе представлены результаты исследования динамического поведения наноиндентора и его взаимодействия с образцом эластомерного материала с помощью численной модели. Предложено учесть ранее не принимавшиеся во внимание факторы, связанные с особенностями взаимодействия нанометровых объектов и исследуемых материалов. Показано, что влияние поверхностных и динамических эффектов существенны при расшифровке данных наноиндентирования. Разработанная модель адекватно описывает движение зонда в процессе наноиндентирования эластомерного материала, а результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00418 мол_а.

## ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

**Д.Н. Карпинский, С.В. Санников**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

dnkarpinskij@sfedu.ru

Выполнен расчет зависимостей коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) трещины в кристалле α-*Fe* от числа последовательно испускаемых дислокаций из ее вершины. Кристалл нагружен удаленной смешанной внешней нагрузкой. Расчет подтвердил ранее известные представления о важной роли процессов релаксации, обусловленных экранированием испущенными дислокациями упругого поля трещины и затуплением ее вершины. Расчет учитывал расщепление ядер дислокаций и возможность образования двойников из испущенных дислокаций. Полученные результаты указывают на изменение соотношения мод КИН у вершины трещины по мере накопления дислокаций.

## ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЯХ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

**Н.С. Кондратьев[1], П.В. Трусов[1], Е.С. Макаревич[1], Н.Д. Няшина[1]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

kondratevns@gmail.com

Представлена многоуровневая модель неупругого деформирования, учитывающая процессы статической рекристаллизации и фазовых переходов. Анализируетсяэволюция геометрии зеренной структуры поликристалла в результате процесса рекристаллизации по механизму движения исходных участков большеугловой границы.Для анализа фазовых переходов предложены кинематические и определяющие соотношения в скоростной форме, критерий фазового перехода, основанный на принципах классической термодинамики необратимых процессов. Разработан комплекспрограмм, основанный на методе конечных элементов, реализующий многоуровневые физические модели материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01292.

## МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА

**Корнев Ю. В., Семенов П. Е., Семенов Н. А., Соляев Ю. О., Валиев Х. Х.**

*Институт прикладной механики РАН, Москва*

yurikornev@mail.ru

При создании эластомерных композитов, конструкций и изделий из них в последнее время существенное внимание уделяется вопросам экологии, а также повышению экономической эффективности и энергоэффективности при их производстве. В ходе работ по данному направлению в ИПРИМ РАН разработана технология получения высокодисперсных наполнителей методом измельчения исходного сырья, для применения их в качестве упрочняющих наполнителей в составе эластомерных композитов. Наилучшие результаты с точки зрения эффекта упрочнения в составе эластомерных композитов были получены с применением в качестве исходного сырья породы шунгит и продуктов переработки рисовой шелухи.

## КОМПОЗИТ ZIGZAG УНТ/ГРАФЕН: МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ВДОЛЬ ОСИ ГРАФЕНА

**А.С. Колесникова[1], М.М. Мазепа[1], И.В. Кириллова[1], Л.Ю. Коссович [1]**

[1]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

kolesnikova.88@mail.ru

В настоящее время колонный графен является наиболее перспективным материалом для использования в наноустройствах**.** В данной работе определена величина модуля Юнга, соответствующего растяжению вдоль графенового полотна композита. Исследования проведены с учетом влияния подложки. Определена зависимость модуля Юнга от длин углеродных zigzag-нанотрубок в ком-

позите. Показано, что модуль Юнга уменьшается с увеличением длин трубок в композите. Наибольший модуль Юнга зафиксирован у композитов с длиной трубок 5.5 Å, он составил 404 ГПа.

## КРУТИЛЬНЫЕ И ОСЕВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ГРАФЕНОВЫХ НАНОЛЕНТ

**Е.А. Корзникова[1], А.В. Савин[2], С.В. Дмитриев[1]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

[2]*Институт химической физики им. Семенова РАН, Москва*

elena.a.korznikova@gmail.com

Известно, что графен, обладая рекордными значениями удельной прочности в плоскости листа характеризуется крайне низкими значениями изгибной жесткости что приводит к крайне низкой устойчивости его плоской формы в условиях отсутствия подложки. В данной работе проведен комплексный анализ влияния крутильыных и изгибных деформаций на конфигурацию и механические свойства нанолент графена в широком диапазоне их геометрических параметров. Установлено, что зависимость сжимающей силы от степени деформации имеет немонотонный характер. Обсуждаются причины данной немонотонности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32-20158

## ОПИСАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛАХ СО СЛОЖНОЙ РЕШЕТКОЙ

**В.А. Кузькин[1,2], А.М. Кривцов[1,2]**

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

kuzkinva@gmail.com

В работе рассматриваются тепловые процессы в кристаллах со сложной решеткой. В начальный момент времени частицы имеют нулевые перемещения и случайные скорости, соответствующие заданному распределению температуры. Выводится приближенная формула, описывающая изменение поля кинетической температуры во времени. Формула с высокой точностью описывает переход к тепловому равновесию и баллистическое распространение тепла в кристаллах с произвольной решеткой. Для примера рассматриваются тепловые процессы в двухатомной цепочке и решетке графена. Предложенный подход может использоваться для описания поведения кристаллов при лазерном воздействии.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-11-00201.

## МОДЕЛИ НАНОМЕХАНИКИ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ФИНИТНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

**В.Л. Леонтьев**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

leontiev_vl@spbstu.ru

Рассматриваются модели наномеханики и численно-аналитические методы их исследования, связанные с применением ортогональных финитных функций (ОФФ). ОФФ – ортогональные функции с компактными носителями, характеризующие локализованность атомов. Свойства ОФФ позволяют создавать модели механики нанотрубок и других наносистем, а также численно-аналитические методы их исследования, дающие приближенные решения как для кинематических, так и для силовых факторов в задачах, связанных с этими моделями, с высокой точностью и гладкостью. Применение ОФФ улучшает свойства дискретных моделей наносистем и снижает вычислительные затраты.

## РАСТЯЖЕНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С АУКСЕТИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ

**Д.С. Лисовенко [1], В.А. Городцов [1]**

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

lisovenk@ipmnet.ru

Дан теоретический анализ продольного и поперечного растяжения тонкой прямоугольной двухслойной пластины, образованной из гексагональных кристаллов с одинаковой ориентацией. Эффективные упругие свойства (модуль Юнга и коэффициенты Пуассона) пластины оказываются зависящими от таких свойств составляющих пластины кристаллов, как знак и величина коэффициентов Пуассона, отношение модулей Юнга и отношение толщин слоев. Показано, что эффективный модуль Юнга и эффективный коэффициент Пуассона пластины всегда превосходят результат, вычисленный по правилу смесей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00736.

## ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОДНОМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ С УЧЕТОМ ВТОРОЙ КООРДИНАЦИОННОЙ СФЕРЫ.

**О. С. Лобода[1,2], А. М. Кривцов[1,2]**

[1]*Санкт-Петербургский Политехнический Университет,Санкт-Петербург*

[21]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

loboda_o@mail.ru

Исследуется влияние второй координационной сферы на процесс распространения тепла в одномерном кристалле.Получено фундаментальное решение задачи о распространении теплового возмущения в цепочке одинаковых частиц с учетом второй координа-

ционной сферы. Используется разработанная ранее модель баллистического характера теплообмена. Показано, что начальное тепловое возмущение развивается в два последовательных фронта тепловых волн.
Скорость первого фронта соответствует максимальной групповой скорости дискретной модели. Скорость второго фронта определяется вторым экстремумом групповой скорости, который возникает при определенном отношении жесткостей первой и второй координационных сфер в решетке.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ

**Р.Т. Мурзаев[1], А.А. Назаров[1], Д.В. Бачурин[2]**
[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
[2]*Institute for Applied Materials, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany*
murzaevrt@gmail.com

Путем компьютерного моделирования исследована релаксация неупорядоченных систем краевых дислокаций при ультразвуковом воздействии. Эволюция дислокаций рассмотрена в модельном поликристалле, в каждом из которых имеется три некомпланарные системы скольжения. Неравновесное состояние границ зерен моделируется при помощи дислокационных стенок. Показано, что ультразвуковая обработка вызывает значительную перестройку дислокационной структуры, уменьшение полей внутренних напряжений и релаксацию упругой энергии. Обнаружено, что существует оптимальная амплитуда, при которой достигается максимальная релаксация дефектной структуры поликристалла.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10126.

## МИКРО- И МЕЗОМЕХАНИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА СТРУКТУРУ СИЛЬНОДЕФОРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.А. Назаров[1,2], Р.Т. Мурзаев[1]**
[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*
aanazarov@imsp.ru

Поликристаллические металлы, подвергнутые пластической деформации, имеют структуру, характеризующуюся высокой плотностью дислокаций в зернах и их границах. Одним из способов релаксации такой структуры является механическое воздействие с помощью ультразвука. В рамках молекулярной и дислокационной динамики исследуются процессы, происходящие в деформированных поликристаллах под действием циклических упругих напряжений, вызванных ультразвуком. Показано, что циклическое воздействие вызывает процессы испускания границами дислокаций, перестройки систем решеточных дислокаций, приводящие к релаксации в материале напряжений и запасенной энергии.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-19-10126.

## ГОМОГЕНИЗАЦИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ УПРУГИХ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ, МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**А.В. Наседкин**
*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*
nasedkin@math.sfedu.ru

Представлены исследования по определению эффективных модулей анизотропных упругих и пьезоэлектрических нанокомпозитов, в которых наноразмерность пор или включений моделируется по теории поверхностных эффектов. В предлагаемом подходе используется набор краевых задач метода эффективных модулей. Эти задачи решаются методом конечных элементов в представительном объеме, сгенерированном с особенностями структуры композита. Поверхностные эффекты моделировались оболочечными элементами на границах раздела фаз. Результаты расчетов показывают влияние структур связности, процента включений и поверхностных эффектов на значения эффективных модулей.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ№ 15-19-10008.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

**А.В. Зайцев[1], И.Ю. Зубко[1], Н.Г. Злобин[1], О.Ю. Исаев[2], Д.В. Смирнов[2], Р.С. Окатьев[1]**
[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[2]*ОАО «Силур», Пермь*
okatjevrs@gmail.com

В работе решается задача о моделировании уплотнительных элементов из терморасширенного графита. Полагается, что рассматриваемые образцы обладают цилиндрической анизотропией. Упругие модули для терморасширенного графита и графена определяются в рамках энергетического подхода с помощью метода атомарной статики. С использованием найденных модулей численно решается задача о нагружении составного кольцевого уплотнительного элемента. Обсуждаются вопросы применения к указанным материалам градиентных моделей.
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-41-590377–р_а).

## СТРУКТУРНЫЕ И КОНТИНУАЛЬНЫЕ-МОМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**С.О.Саркисян**

*Ширакский государственный университет, Гюмри, Армения*

s_sargsyan@yahoo.com

В данной работе для изучения деформаций нанокристаллических материалов предлагается микрополярный (моментный)-стержневой (континуальный) подход, а соответствующая модель была построена при рассмотрении атомной линейной цепочки с нецентральными силовыми и моментными взаимодействиями между атомами. На основе энергетических соображений определены упругие постоянные микрополярного стержня через параметры построенной дискретной модели.Для микрополярной-стержневой модели излагается принцип возможных перемещений, на основе которого разработан метод конечных элементов, который позволяет строить соответствующие алгоритмы для изучения задач упругих деформаций различных нанокристаллических материалов.

## НАНОМЕХАНИКА И НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ МЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

**А.Л. Свистков**

*ИМСС УрО РАН, Пермь*

svistkov@icmm.ru

В работе рассмотрены отличия наномеханики сплошной среды от классической механики деформируемого твердого тела. Проявляются эти отличия в формулировке граничных условий. Показано, что в нанокомпозитах смягким связующим появляется напряженно-деформированного состояние в результате деформации поверхности раздела фаз. Уменьшается кривизна поверхности образцов и происходит небольшое погружение выступающего активного наполнителя внутрь материала. Особенности наномеханики необходимо учитывать в задачах моделирования взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с мягкими деформируемыми средами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00725.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ AL-SIC В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИЙ

**А.С. Смирнов[1], А.В. Коновалов[1]**

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

smirnov@imach.uran.ru

Работа посвящена верификации структурно-иерархической модели сопротивления деформации для описания реологического поведения металломатричных композиционных материалов.В исследовании в качестве модельных материалов выступали композиты с матрицей на основе сплава АМг6 и В95, армированные 10% карбида кремния. Верификация модели была проведена по экспериментальным данным, полученным при температуре деформации 400 °С в диапазоне скоростей деформаций 0,1-5 $с^{-1}$. Результат верификации показали, что модель может быть использована для описания реологического поведения металломатричных композитов при высокотемпературной пластической деформации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00765 в части исследования реологического поведения композита на основе сплава В95 и в рамках научно-исследовательской работы Института машиноведения. УрО РАН (проект № 0391-2016-0001) в части исследования реологического поведения композита на основе сплава АМг6.

## ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

**П.А. Скорынина[1], Н.Н. Соболева[2], А.В. Макаров[1,2], А.И. Меньшаков[3], А.Л. Осинцева[1]**

[1]*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

[2]*Институт физики металлов имени М.Н. МихееваУрО РАН, Екатеринбург*

[3]*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург*

natashasoboleva@list.ru

Рассмотрена возможность повышения микромеханических свойств поверхностного слоя аустенитной хромоникелевой путем применения нового метода цементации в плазме низкоэнергетического электронного пучка. Установлено, что плазменная цементация при $T_Ц$=350 °С способствует росту характеристик прочности и сопротивления поверхностного слоя стали 04Х17Н8Т упругому и пластическому деформированию.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00561_мол_а и в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790148-1 и ИФМ УрО РАН по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6.

## КЛАССИЧЕСКИЕ И МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОНСТИТУТИВНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**П.В.Трусов**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

tpv@matmod.pstu.ac.ru

Возрастающие требования к точности описания поведения материалов побуждают механиков к построению все более сложных определяющих соотношений (ОС). Значительная часть предлагаемых ОС базируется на феноменологическом подходе и макроэкспериментах. Учитывая свойство памяти деформируемых тел, идентификация ОС требует огромного числа опытов; отмечаются другие сложности этого подхода для построения ОС. В последние 15-20 лет бóльшую популярность приобретает иной подход – многоуровневое моделирование, основанное на введении внутренних переменных и физических теориях. Обсуждается структура, особенности построения и примеры применения таких моделей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-19-01292.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМАТЕРИАЛОВ

**В.М. Фомин[1,2], А.А. Филиппов[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

filippov@itam.nsc.ru

В настоящей работе рассматривается экспериментально-теоретический метод определения зависимости упругих характеристик наночастиц в составе механической смеси в зависимости от диаметра частиц. Метод основан на разрешении уравнений осреднения упругих характеристик гетерогенного материала. В качестве объектов исследования выбраны порошки диоксида кремния в полимерных композитах на основе эпоксидной смолы. Добавление нанопорошков кремния приводит к росту модуля упругости. Для порошков одного происхождения наблюдается рост модуля упругости с уменьшением характерного диаметра частиц наполнителя при постоянной концентрации.

## МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.

**А.В. Уткин[1], Е.И. Головнева[1]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

utkin@itam.nsc.ru

В представленном исследовании при помощи метода молекулярной динамики было исследовано ударное взаимодействие сферического кластера карбида кремния 3C-SiC с недеформируемой стенкой в широком диапазоне скоростей. Анализ полученной структуры показал, что, не смотря на высокое давление в момент удара, структурная фазовая трансформация в материале не происходит.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-41-540013 р_а.

## ОСОБЕННОСТИ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НАНОТРУБОК

**В.И. Шабуневич**

*Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт (ВНИКТИ), Коломна*

Viktor-shab@yandex.ru

В данной работе с помощью гармонического анализа конечно-элементных (КЭ) разномасштабных моделей трубчатых тел показаны некоторые особенности деформирования, присущие телам нано-размеров, а именно, наличие в графиках зависимостей перемещений и напряжений от частоты нагружения значительных ступенчатых приращений амплитуд указанных параметров и значительных приращений магнитуд ускорений при увеличении частоты нагружения. Расчеты проводились с использованием программного комплекса MSC Patran/Nastran.

## МОДЕЛЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Ф.З. Утяшев [1], Р.З. Валиев [2]**

[1]*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, институт перспективных материалов*

ufz1947@mail.ru

В основе модели лежат общие закономерности эволюции микроструктуры в металлах в процессе интенсивной пластической деформации (ИПД). Основные этапы эволюции включают образование дислокационных скоплений и их преобразование в различные границы областей. Для установления связи между деформированным и структурным состоянием в модели использован фундамен-

тальный принцип Бишопа-Хилла о максимуме работы сдвига и экспериментальный факт накопления в условиях холодной деформации максимальной плотности дислокаций в скоплениях. В работе произведена верификация модели и предложены рекомендации по повышению эффективности методов ИПД.
Работа выполнялась в рамках государственного задания ИПСМ РАН (№ гос. рег.АААА-А17-117041310215-4).

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

**В.Е. Шавшуков**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

shavshukov@pstu.ru

Флуктуации неоднородных мезодеформаций в зернах поликристаллических материалов оценены с помощью теоретико-полевого подхода к решению краевых задач деформирования микронеоднородных материалов. Вычислены экстремальные величины флуктуаций, реализующиеся в специфических паттернах микроструктуры и имеющие важное значение для критических явлений типа зарождения трещин. Максимальные деформации в зернах превосходят макродеформации в несколько раз. Экстремальные флуктуаций во внутренних зернах значительно выше чем в зернах на поверхности. Приведены количественные данные для одноосного растяжения поликристаллического цинка.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-41-590433б, № 18-01-00675.

## МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: ОПИСАНИЕ ПОДГОТОВКИ И РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМА СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

**А.И. Швейкин, П.В. Трусов, Э.Р. Шарифуллина, Т.В. Останина**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

shveykin@pstu.ru

Предложены геометрически и физически нелинейные многоуровневые модели поликристаллических металлов и сплавов, учитывающие ключевые механизмы неупругого деформирования: внутризеренное дислокационное скольжение, развороты кристаллических решеток зерен, измельчение зеренной структуры, зернограничное скольжение, лидирующее при сверхпластическом деформировании и переходе к нему, и аккомодационные механизмы, сопровождающих его – зернограничную диффузию и динамическую рекристаллизацию. Модели описывают изменение структуры материала и эксплуатационных свойств, что позволяет применять их для совершенствования методов термомеханической обработки. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01292.

## Симпозиум «МЕХАНИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ»

### ПРОБЛЕМЫ ПОДЗЕМНОЙ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ

**А.А. Афанасьев**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

afanasyev@imec.msu.ru

В докладе рассматриваются современные проблемы моделирования фильтрационных течений, осложняющихся многофазными термодинамическими равновесиями жидкостей и газовв условиях значительного изменения давления и температуры. Формулируются сопряженные модели подземной гидромеханики, термодинамики и геохимии для решения отмеченных проблем в ряде геофизических приложений. Дается обзор результатов исследований течений в задачах, связанных с подземным захоронением углекислого газа, формированием рудных месторождений и кимберлитовых трубок, а также конвективными течениями в геотермальных системах

### ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПРЕДПОСЫЛКИ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Л.А. Агаловян**

*Институт механики НАН РА*

*lagal@sci.am*

Возникновение сильных землетрясений современная наука связывает с тектоникой Литосферных плит Земли ( $\approx 95\%$ землятресений). Процессы, связанные с землетрясениями принято делить на два состояния: медленные (вековые) и скачкообразные (быстротечные). Вековые движения квазистатические, могут длиться десятки лет. В результате в Литосферной плите и в блоках земной коры накапливаются деформации, которые, достигнув $10^{-4}$ , приводят к глобальному разрушению – землетрясению. Быстрые (скачкообразные) движения возникают в результате форшока, самого землетрясения и афтрешока. Магнитуда землетрясений зависит от величины накоплений энергии деформаций, которую можно найти, лишь зная напряжения и перемещения. В шестидесятые годы XX столетия сейсмологи обнаружили изменения геометрии лицевой поверхности Земной коры до землетрясения. Встал естественный вопрос: зная структуру местности (слоистость, толщину, упругие характеристики и плотность слоев) и значения перемещений точек лицевой поверхности – как данные сейсмостанций, систем *GPS* , наклономеров и других измерительных систем, можно ли определить напряженно-деформированное состояние местности и проследить за его изменением во времени. В работе этот вопрос решен положительно. Решены соответствующие 3*D* квазистатические и динамические задачи теории упругости для пакета из произвольного числа ортотропных слоев, когда лицевая поверхность пакета свободна, но известны перемещения ее точек. Указаны случаи, когда найденное решение является математически точным. Рассмотрены случаи, когда измерения сняты со слоев, расположенных глубже. Найденное решение и периодически проводимые измерения позволяют проследить весь процесс подготовки землетрясений, выявить критические состояния и их расположение.

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАРУШЕНИЯ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗУМПФЕ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

**Р.З. Акчурин,А.Ш. Рамазанов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

Ac4urin.ruslan@yandex.ru

В геофизике одним из важных направлений является геотермия - наука об изучении теплового поля Земли. Одной из основных задач геотермии является определение ненарушенной температуры горных пород. В скважинной термометрии геотермаявляется фоном при выявлении и анализе температурных аномалий, связанных с продуктивными пластами и нарушениями целостности колонны. На сегодняшний день не существует общепринятых методов определения невозмущенной температуры горных пород. Используемые на практике методы имеют ряд недостатков и позволяют лишь приблизительно оценить естественную температуру пород. Одним из источников для определения параметров геотермического поля может стать распределение температуры в зумпфовой части добывающих нефтяных скважин. В работе исследуются мешающие факторы, влияющие на распределение температуры в зумпфе скважины.

### ДЕФОРМАЦИИ ЛИТОСФЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ИНЕРЦИИ ВРАЩЕНИЯ И СИЛ РЕАКЦИИ АСТЕНОСФЕРНОГО СЛОЯ

**А.А. Баймухаметов [1], К.К. Коксалов [2]**

[1]*Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан*

[2]*Казахский национальный педагогический университет, Алматы, Казахстан*

abayab@mail.ru ,kkapal@mail.ru

Деформация вязкоупругой литосферы исследована под действием сил инерции вращения и вязких сил сферического течения Куэтта в астеносфере, определяющего природу внутреннего геодинамического давления и тангенциальных напряжений. В зависимости от разности угловых скоростей вращения литосферы и мантии литосферная оболочка может находиться в условиях всестороннего расширения или сжатия. Найден механизм локальных изменений толщины литосферы в результате неустойчивости ее деформирования под действием внутреннего давления и объемных сил инерции вращения. Устойчивость деформирования исследована методом Лейбензона-Ишлинского. В рамках вязкоупругой реологии литосферы анализируется напряженно-деформированное состояние литосферной плиты при двустороннем сжатии.

## О ПРОНИКНОВЕНИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВКОМУ КОМЕТЫ 67/РЧУРУМОВА-ГЕРАСИМЕНКО

**В.Б. Баранов**

*Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

baranov@ipmnet.ru

В коме комет магнитометры должны фиксировать исчезновение межпланетного магнитного поля, так как у комет собственное магнитное поле отсутствует. В физических условиях космического пространства структура (толщина) тангенциального разрыва, отделяющего кометную и межпланетную плазмы, в стационарном случае может определяться эффектом Холла [1]. Данные, полученные при помощи аппарата Rosetta вблизи кометы Чурюмова – Герасименко показывают, что граница между комой кометы и солнечным ветром имеет нестационарный характер. В докладе проводится анализ возможности определения толщины таких границ (magneticcavities) в нестационарных условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00302.

## ДИНАМИКА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ОСТРОВЕ САМОЙЛОВСКИЙ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

**В.М. Белолипецкий[1], С.Н. Генова[1], С.Ю. Евграфова[2]**

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

[2]*Институт леса СО РАН, Красноярск*

belolip@icm.krasn.ru

Теоретическое описание температурного поля в почвах при их промерзании или оттаивании осуществляется с помощью решений задач Стефана. Математическая модель основывается на уравнениях теплопроводности для мерзлых и талых слоев. В вертикальной структуре зоны вечной мерзлоты выделяются слои: талый грунт, мерзлый грунт, вода, лед, снег. Предлагается упрощенный численный алгоритм решения одномерных (в вертикальном направлении) задач теплопроводности с подвижными границами фазового перехода с образованием новых и аннулированием существующих слоев. Разработанная компьютерная программа использовалась для моделирования динамики вечной мерзлоты на острове Самойловский. Результаты расчетов согласуются с данными натурных наблюдений.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ И АБЛЯЦИИ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ

**И.Г. Брыкина**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

shantii@mail.ru

Рассматриваетсяпроблема моделирования взаимодействия крупного метеороида с атмосферой. Разработана модель разрушения метеороида на облако фрагментов, движущихся с общей ударной волной, учитывающая изменение формы и плотности этого облака. Для расчета абляции метеороида получено аппроксимационное выражение для коэффициента радиационной теплопередачи. С применением физической теории метеоров моделируется унос массы, энерговыделениеи световая кривая Челябинского болида и проводитсясравнение с даннымина блюдений. Анализируется влияние коэффициента теплопередачи на характеристики взаимодействия метеороида с атмосферой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00740.

## РАСТЕКАНИЕ ЛАВЫ, КАК НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ, ПРИ УСЛОВИИ ЧАСТИЧНОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Е.А. Веденеева**

*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

el_vedeneeva@imec.msu.ru

Решается задача о растекании лавы как неньютоновской жидкости по горизонтальной поверхности. На подстилающей поверхности вместо условия прилипания ставится условие частичного проскальзывания. Лава моделируется степенной жидкостью. В приближении тонкого слоя задача сводится к решению одного нелинейного уравнения в частых производных второго порядка с интегральным условием. Для степенной зависимости расхода лавы от времени получено автомодельное решение, которое, однако, существует только при ограничении на параметры задачи. Также рассматривается неавтомодельное решение. Показано, что при учете проскальзывания, скорость распространения лавы может быть существенно выше.

## ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТЕЧЕНИЯХ СМЕСИ ГАЗА С ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

**Н.В. Горохова**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

GorokhovaNV@imec.msu.ru

Строится модель течения смеси газ –заряженные частицы. Для моделирования движения заряженных частиц используется подход Лагранжа. На частицы действуют гидродинамические силы, электростатические силы и сила тяжести. В результате столкновений скорости и заряды частиц меняются. Величина передаваемого заряда зависит от упругих и электрических свойств материала частиц, их масс и скоростей при ударе. Исследовано влияние количества частиц, их концентрации и доли крупных частиц на течение

смеси. Получено, что максимальная напряжённость электрического поля и максимальный заряд растут с увеличением числа частиц по степенному закону.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00028 А.

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПОДЗЕМНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ

**О.И. Дударь, Е.С. Дударь**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

olegdudar@yandex.ru

Описано применение феноменологической теории турбулентного течения, основанной на использовании аналитического описания экспериментальных кривых сопротивления Никурадзе, для анализа процессов тепло-и массообмена в подземных вентиляционных сетях. Рассмотрен процесс нагрева воздушной струи, поступающей в глубокий рудник, до температуры горных пород. Выполнен анализ влияния естественной тяги на величину расхода поступающего в течение года в модельную вентиляционную сеть воздуха. Исследовано влияние некоторых аэрологических, климатических, геотехнологических, геофизических параметров на процесс конденсации влаги в подземной вентиляционной сети.

## О НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЯХ ДРОБЛЕНИЯ МЕТЕОРОИДОВ

**Л.А. Егорова[1], М.Д. Брагин[2,3], И.Г. Брыкина[1]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва*

[3]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

egorova@imec.msu.ru

Развиты модели разрушения космических тел в атмосфере: модели облака фрагментов, движущихся с общей ударной волнойи модель мгновенного дробления с независимым движением осколков со степенным распределением их по массам. Проведено сопоставление разработанных моделейоблака фрагментов симеющимися в литературе. Для предложенных моделей получены аналитические и численные решения уравнений физической теории метеоров для изменения скорости, массы и кинетической энергии раздробленного метеороида вдоль траектории. Рассчитаны световые кривые для двух суперболидов.Проведено сравнение с наблюдательными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00740.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**Ж.Ш. Жантаев[1], А.С. Ким[1], Ю.Р. Шпади [2], Ю.Г. Литвинов [1]**

[1]*Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан*

[2]*Институт космической техники и технологий, г. Алматы, Казахстан*

kim.as@mail.ru

Разработаны математические модели тектонического разлома с линиями пластичности на его продолжении. Проведено аналитическое исследование и представлена компьютерная визуализация квазистатических процессов:построены графики времени развития линий пластических деформаций, графики скоростейсмещений берегов разрыва. Определено предельное состояние и условия полного перехода перемычки между разломами в пластическое состояние, выявлены различия в вариациях скоростей смещений устойчивых приразломных зон и зон неустойчивости.

Работа выполнена по проекту № 0118РК00799 РБП-008 РК.

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОТОКОВ НА СКЛОНАХ

**Ю.С. Зайко[1], М.Э. Эглит[2]**

[1]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

zayko@imec.msu.ru

Доклад посвящен анализу устойчивости однородного потока, движущегося по склону постоянного уклона, по отношению к косым возмущениям. Для описания движения потока используются уравнения в гидравлическом приближении, функция, описывающая трение о дно, считается произвольной, зависящей от осредненной скорости и глубины потока. Предполагается, что возмущения малы и могут распространяться под произвольным углом к вектору осредненной скорости потока. Выписано дисперсионное уравнение, проведен анализ положения его корней, получен критерий устойчивости. Показано, что для потоков с нелинейной зависимостью трения от скоростимогут существовать растущие косые возмущения, тогда как продольные возмущения не растут.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 18-38-00745, № 18-29-10020, № 18-08-00074.

## КИНЕТИКО-МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕЛИОСФЕРЫ И АСТРОСФЕР: СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**В.В. Измоденов**[1,2,3]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт космический исследований РАН, Москва*

[3]*Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

vlad.izmodenov@gmail.com

Представлены результаты моделирования взаимодействия солнечного/звездных ветров с межзвездной средой, которые получены в рамках трёхмерной кинетико-МГД модели взаимодействия, включающую в себя плазменную и нейтральную компоненты межзвёздной среды и солнечного ветра, магнитные поля, широтные и временные изменения параметров солнечного ветра. Особое внимание уделяется эффектам, связанным с магнитными полями. Описанная модель объясняет экспериментальные данные, полученные на космических аппаратах Вояджер-1 и 2, IBEX и др. На её основе удалось определить параметры межзвездной среды и межзвездного магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке фонда «Базис» гранта 18-1-1-22-1.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПОЛЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

**Л.Х. Ингель**[1,2], **А.А. Макоско** [2]

[1]*"НПО "Тайфун", Обнинск*

[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

lev.ingel@gmail.com

В динамической метеорологии (геофизической гидродинамике) поле силы тяжести обычно принимается однородным. Между тем, известно, что на среднюю силу тяжести у поверхности Земли накладывается широкий спектр аномалий (неоднородностей) силы тяжести. В докладе сообщается о цикле теоретических (аналитических) исследований влияния таких неоднородностей на динамику атмосферы. Вопреки распространенному мнению, неоднородности поля силы тяжести могут, вообще говоря, приводить к возмущениям поля ветра. Оценки показывают, что такое влияние в некоторых ситуациях может быть заметным. Установлены некоторые физические механизмы генерации атмосферных возмущений в неоднородном поле силы тяжести.

## ОБ ОДНОМ ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАВИХРЕННОСТИ В СМЕРЧАХ

**Л.Х. Ингель**[1,2], **Б.Я. Шмерлин** [1]

[1]*"НПО "Тайфун", Обнинск*

[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

lev.ingel@gmail.com

Конвекция, обусловленная двойной (дифференциальной) диффузией во вращающейся среде, вообще говоря, может приводить к переносу завихренности, в частности, к ее концентрации. В докладе обращается внимание на то, что в атмосфере возможны процессы, с заметным переносом завихренности, обусловленным различием эффективных коэффициентов переноса для разных субстанций – тепла, тяжелой примеси (гидрометеоров), водяного пара. Рассмотрена простейшая линейная модель конвекции, обусловленной двойной диффузией во вращающейся среде. Обсуждается возможность вклада подобных эффектов в концентрацию завихренности при зарождении смерчей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00300.

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОГРАФИИ

**Д.П. Касымов**[1], **М.В. Агафонцев**[1], **В.В. Перминов**[1], **В.В. Рейно**[2]

[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

[2]*Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск*

denkasymov@gmail.com

Проведен комплекс экспериментальных исследований в лабораторных условиях с применением ИК-диагностики по оценке поля температуры на поверхности образцов древесных строительных материалов в результате воздействия модельного очага пожара. Проанализировано влияние различных огнезащитных составов на пожароопасные свойства образцов, определены скорости обугливания, а также величина глубины обугливания в зависимости от сорта древесины. Показана возможность применения ИК-термографии и преимущества перед существующими контактными методами измерения пожароопасных характеристик древесины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК – 3885.2018.8.

## ОБРАЗОВАНИЕ СЛОЯ РАСПЛАВА В АСТЕНОСФЕРЕ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ 220КМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРИЛИВНОЙ ВОЛНЫ КРУПНОГО ГЛИССИРУЮЩЕГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ

**С.Ю. Касьянов[1], В.А. Самсонов[2]**

[1]*Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова, Москва*

skas53@yandex.ru

Рассматриваетсядвижение крупного глиссирующего спутника Земли сверхзвуковое длягоризонтов мантии выше некоторой поверхности (назовем её поверхностью Маха) и дозвуковоениже. Прилив в мантии создаёт на поверхности Маха горизонтальное напряжение, превышающее предел прочности на сдвиг и смещает вышележащий слой мантии. В слое трения вещество плавится, уменьшая скорость Р волн. Поверхность Махамонотонноопускается.Образуетсяслой расплава в астеносфере и скачок скоростей Р волн. К моменту погружения спутника в мантиюнижняя граница расплава достигла 220км. После затвердеваниячасти расплава в астеносфересохранились слой пониженных скоростей сейсмических волн и граница 220км.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**А.С. Ким[1], Ю.Р. Шпади [2], Ю.Г. Литвинов [1], А.М. Малимбаев [1]**

[1]*Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан*

[2]*Институт космической техники и технологий, г. Алматы, Казахстан*

kim.as@mail.ru

Проведено математическое моделирование динамических процессов в напряженной среде при внезапном возникновении разрыва с контактирующими берегами. На основе аналитического решения для поля смещений в зоне конечного разрыва представлена компьютерная визуализация развития во времени суммарного поля смещений в очаговой зоне с учетом поля повторных цилиндрических волн. Установлено, что на магистральном разрыве могут происходить реверсные смещения берегов разрыва, а суммарное поле перемещений стремится к своему статическому состоянию.

Работа выполнена по проекту № 0118РК00799 РБП-008 РК.

## ОБОСНОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИИ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

**В.Д. Котелкин[1], Л.И. Лобковский [2]**

[1] *Московский государственный университет, Москва*

[2] *Институт океанологии РАН, Москва*

kotelkin@mech.math.msu.su

Обсуждаются две схемы эволюции Арктического региона. Проведено численное моделирование субдукции океанической литосферы под континент. Выявлена гидродинамическаяприрода эволюции континентальных окраин. Главной движущей силой региональной геодинамики служит термохимическая конвекцияв верхней мантии, которую отличаетрастущая конвективная ячейка. Погружающееся холодное вещество движется под континент, вытесняя горячее веществонаверх и назад, что и оставляет наблюдаемые на земной поверхностимагматические и рифтогенные следы. Результаты моделирования согласуются с данными сейсмотомографии по Азиатско-Тихоокеанскому региону.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ УЕДИНЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ

**В.Ю. Ляпидевский, А.А. Чесноков**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

chesnokov@hydro.nsc.ru

Предложена длинноволновая модель, описывающая нестационарное взаимодействие и эволюцию уединенных внутренних волн большой амплитуды. Уравнения движения являются расширением системы уравнений Грина–Нагди, разработанных для слоистых стратифицированных течений. Построены решения трехслойной модели в приближении Буссинеска с учетом гидростатичности давления в промежуточном слое и перемешивания между слоями. Показано, что представленные уравнения движения, учитывающие дисперсионные эффекты, описывают эволюцию внутренних волн для различных типов течений в полевых и лабораторных условиях.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН (проект № II.1.2).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ЛЬДА В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

**А.В. Марченко**

*Университетский центр на Свальбарде, Норвегия*

Aleksey.Marchenko@unis.no

Создано оборудование и разработана методика экспериментов, позволяющих измерять механические характеристики ледяного покрова при сжатии, изгибе, растяжении и сдвиге, а также исследовать характеристики взаимодействия плавающих ледяных бло-

ков. Начиная с 2010 года исследования проводятся ежегодно на припайном льду фиордов Шпицбергена и на дрейфующем льду Баренцева моря, а также в лаборатории Университетского центра на Свальбарде. Результаты тестов использованы для валидации моделей морского льда, параметризации модели затухания поверхностных волн в ледовом покрове и расчета сил, возникающих при соударении тел с плавающим льдом.

## О ВЛИЯНИИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ МАГМЫ НА ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛЕ ВУЛКАНА

**Ю.Д. Цветкова,О.Э. Мельник**

*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

melnik@imes.msu.ru

Традиционно течение магмы в канале вулкана описывается в рамках одномерных или квазиодномерных моделей с учетом зависимости вязкости от концентрации кристаллов, профиль скорости считается параболическим и производится осреднение параметров поперек канала. В статье результаты расчетов по квазидвумерной модели сравниваются с одномерными. Показано существенное отличие профиля скорости от параболического, и зависимости расхода магмы от давления в очаге.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-17-00030

## ТРИГГЕРНЫЙ ХАРАКТЕР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗОВЫХ ПРОРЫВОВ И ТОРНАДО

**В.Л. Натяганов[1], С.А. Маслов[1,2]**

*[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

*[2]Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

tenzor-home@yandex.ru

Анализируются триггерные факторы электромагнитной природы в начальных процессах генерации струйных низовых прорывов и торнадо из грозовых облаков. Показано, что основную роль при этом играют сильные возмущения атмосферного электрического поля и эффект гигантской диэлектрической проницаемости суспензии заряженных капель с двойным электрическим слоем на их поверхности. Предложена двухпараметрическая формула, описывающая перезарядку дипольного облака в трипольное, на основе которой обоснованы и некоторые характерные черты воронки торнадо (воротник, каскад, закрутка, электрическая активность).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИЛИВНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ДВИЖЕНИЕ ВНУТРЕННИХ МАСС ЗЕМЛИ

**Д.Н. Николаев, Ю.М. Григорьев**

*Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, Физико-технический институт, Якутск*

djulusnikolaev@gmail.com

Гравитационное воздействие Луны на Землю создает приливную волну, которая деформирует форму и замедляет вращение Земли. Выдвинута гипотеза, что из-за эллиптической формы мантии, частота вращения внутреннего ядра может отличаться от частоты вращения мантии и верхних слоев. Для объяснения этого эффекта используются уравнения Навье - Стокса, которые описывают движение жидкого внешнего ядра. После анализа результата был получен западный дрейф твердого ядра (частота вращения меньше).

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТА ЗЕМЛИ

**В.П. Пархоменко**

*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва*

parhom@ccas.ru

Исследование основано на трехмерной гидродинамической модели глобального климата, включающей модель общей циркуляции атмосферы, модель океана в геострофическом приближении с фрикционным членом в уравнениях горизонтального импульса с реальной конфигурацией глубин и континентов, модель эволюции морского льда. Расчеты прогнозирования климата до 2100 года с использованием сценариев роста $CO_2$. Установлено существенное уменьшение меридионального потока воды в Атлантике при реализации жесткого сценария. Моделирование возможности существования двух различных состояний климатической системы – с развитой и подавленной термохалинной циркуляцией в Атлантике. Анализ методов геоинженерии для стабилизации климата.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00693.

## ГИДРОДИНАМИКА НАВОДНЕНИЙ И ПЕРЕНОС ЗАГРЯЗНЕНИЙ РУСЛО-ПОЙМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

**А.В. Шатров[1], Б.В. Архипов [2], С.Л. Рычков[3]**

[1]*Кировский государственный медицинский университет, Киров*

[2]*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва*

[3]*Вятский государственный университет, Киров*

avshatrov1@yandex.ru

Представлены результаты моделирования процесса прохождения весеннего паводка в пойме реки. Модель используется для прогноза процессов переноса загрязнений во время весенних наводнений, проходящих в Кирово-Чепецкой пойме реки Вятки.Проверка

модели была сделана посредством спутниковых снимков области распространения наводнения и данных контроля для концентраций загрязнений, предоставленных экологическими службами Кировской области. Численная реализация модели позволяет моделировать влияние защитных инженерных гидротехнических сооружений для управления паводковыми потоками.
Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ, проект 2014/66 № 1281, рег. № 114123040133

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

**А.В. Шатров[1], С.Л. Рычков[2]**
[1]*Кировский государственный медицинский университет, Киров*
[2]*Вятский государственный университет, Киров*
avshatrov1@yandex.ru

Рассматривается адвективный перенос аэрозольной субстанции природного или техногенного происхождения в атмосферном приземном слое. Мезомасштабная квазидвумерная модель в приближении мелкой воды, записанная в терминах «функция тока–вихрь», рассчитывает средние по слою характеристики скорости, температуры, концентрации примеси, а также распределение оседающих частиц на поверхности. Показано, что неоднородность распределения температурына поверхности существенно определяет поведение всех характеристик слоя.
Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №. 16-07-20394

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ГАЗОНОСНОГО УГЛЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**В.Н.Одинцев, И.Е. Шиповский**
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук», Москва*
iv_ev@mail.ru

Изучение механизма разрушения газонасыщенного угольного пласта включало моделирование распространения взрывной волны в пласте, порождаемой различными зарядами ВВ, и разработку модели развития наведенной взрывной волной трещины за счет диффузии метана в трещину, перехода на ее берегах метана из связанного состояния в свободное и роста трещины под действием давления образовавшегося в ней газа. Показано, что в зависимости от механических и диффузионных параметров угля наведенная трещина в одних случаях может быть стабильной, в других случаях – спустя некоторое время может начать развитие в динамическом режиме.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-05-00912.

## ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДОННОЙ ВОЛНЫ

**И.И. Потапов, Ю.Г. Силакова**
*Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск*
silakovayu@ccfebras.ru

В работе сформулирована и решена задача об устойчивости донной волны в напорном канале. Для постановки сформулированной задачи найдена аналитическая зависимость, позволяющая определить скорость роста донных волн. Выполнен сравнительный анализ полученного аналитического решения с известными экспериментальными данными. Сравнение проведено для безотрывных потоков, обтекающих донные волны малой крутизны. Изучено влияние основных параметров модели на скорость роста донных волн.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00530 А.

## ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ УСТАНОВКИ ГИДРОКРЕКИНГА ОТ ПОВЫШЕННЫХ ВИБРАЦИЙ, ГИДРОУДАРОВ И ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТАБИЛИЗАТОРОВ ДАВЛЕНИЯ.

**Г.Р. Аветисян, А.А.Симонян**
*Отдел гидромеханики и вибротехники НАН РА, Гюмри*
anahit.gasparyan56@mail.ru

Для защиты трубопроводов установки гидрокрекинга от повышенных вибраций,гидроударов и пульсаций давления предлагается применять сравнительно малым рабочим обьемом стабилизатор. Энергия ударной волны и пульсации давления расходуется на диссипацию в трубках и на потенциальную энергию упругих элементов. Предлагаемый стабилизатор при оптимальной подборе размеров и упругих элементов может гасить 90% ударного давления и 95% пульсаций давления.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМАХ

**С.В. Смирнов**
*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*
smirnoff@iacp.dvo.ru

В докладе рассматриваются различные аспекты применения численной модели мелкой воды с разностной аппроксимацией на нерегулярной треугольной пространственной сетке для исследования пространственно-временных параметров резонансных колебаний в природных водоемах, на примере отдельных акваторий залива Петра Великого Японского моря.Расположение пиков на модель-

ных резонансных кривых соответствует хорошо выраженным максимумам энергетического спектра по данным натурных измерений.Это показывает возможность существенного резонансного усиления колебаний уровня волновыми и периодическими ветровыми воздействиями.

Работа выполнена при поддержке проектов № 0262-2018-0001, 0262-2018-0060.

## ПРОСТАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОРНАДО

**А.А. Таюрский[1], М.Б. Гавриков[1,2]**

[1]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

tayurskiy2001@mail.ru

В работе предложена математическая модель торнадо, согласно которой закрученные потоки восходящего воздуха имеют место без учета силы Кориолиса и вертикальной конвекции теплого воздуха. Необходимыми условиями возникновения торнадо являются наличие вихревого движения в верхних слоях атмосферы и рост давления воздуха по мере удаления от центра торнадо. Нахождение параметров течения воздуха в торнадо сводится к решению краевой задачи для параболического интегро-дифференциального уравнения относительно комплексной “температуры”.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ЛЕД, СОПРОВОЖДАЕМОГО ЕГО РАЗРУШЕНИЕМ

**Б.И. Тазетдинов**

*Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск*

bulatbirsk@yandex.ru

Построена математическая модель процесса течения газа в канале, содержащим лед, сопровождаемое его тепловым разрушением. Получена система дифференциальных уравнений для нахождения распределений основных параметров газожидкостного потока по высоте канала (давления, температуры и скорости).

## АНАЛИТИЧЕСКОЕРЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АЭРОТЕРМОБАЛИСТИКИ И СВЕЧЕНИЯ МЕТЕОРОИДА С УЧЕТОМ УНОСА МАССЫ

**Г.А. Тирский**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

tirskiy@imec.msu.ru

Рассматривается моделированиевзаимодействия с атмосферойметеороида, движущегося как единое, недробящееся тело, на основе решения уравнений физической теории метеоров (ФТМ).Получено приближенное аналитическое решение уравнений ФТМ при постоянном параметре уноса массы для изменения скорости, массы, скоростного напора и светимости метеороида вдоль траектории. Проведено сравнение этого решения с точным решением уравнений ФТМ. Предложен численно-аналитический метод решения уравнений ФТМ с учетом переменности параметра уноса массы, использующий аналитические решения уравнений ФТМ при постоянном параметре уноса массы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00740.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИСПРОПОРЦИОНИРОВАНИЯ ДИОКСИДА СЕРЫ

**И.С. Уткин[1], О.Э. Мельник [1], А.А. Афанасьев [1], Н.Н. Акинфиев [2]**

[1]*НИИ Механики МГУ, Москва*

[2]*ИГЕМ РАН, Москва*

utkin@imec.msu.ru

В работе рассматривается процесс формирования медного месторождения в результате дегазации магматического очага. Этот процесс описывается в рамках модели многофазной неизотермической фильтрации смеси вода-соль-хлорид меди-диоксид серы. Исследуется влияние количества диоксида серы в поступающей из очага жидкости на размер, форму и расположение зоны отложения меди. Показано, что учет реакции диспропорционирования диоксида серы существенно влияет на параметры сформировавшегося месторождения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-17-10199.

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ НА ДИНАМИКУ СКЛОНОВЫХ ПОТОКОВ

**М.Э. Эглит[1], А.Е. Якубенко[2], Т.А. Якубенко[2]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

*m.eglit@mail.ru*

Рассматриваются природные склоновые потоки, такие как снежные лавины, оползни, лавовые потоки.Движущийся материал в таких потоках имеет сложные реологические свойства, может останавливаться на наклонных склонах, что свидетельствует о наличии предела текучести. Приводятся результаты численного исследования влияния предела текучести на динамику склоновых потоков, а также на скорость захвата ими донного материала. Показано, что наличие предела текучести в ламинарных потоках приводит к уменьшению скорости и увеличению скорости захвата; в турбулентных потоках может наблюдаться обратный эффект.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-01-00361, 17-08-0115.

# ВЛИЯНИЕ ЗАХВАТА ДОННОГО МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИКУ СКЛОНОВЫХ ПОТОКОВ

**А.Е. Якубенко[1], М.Э. Эглит [2], Т.А. Якубенко[1]**

[1]*Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

*yakub@imec.msu.ru*

Природные склоновые потоки, такие как снежные лавины, оползни, селевые потоки, а также подводные потоки на дне морей, при движении захватывают значительное количество подстилающего донного материала.В докладе представлены математические модели различных склоновых потоков, учитывающие этот процесс. Приведены результаты численного исследования влияния захвата склонового материала для потоков с разными реологическими свойствами и разными режимами движения (ламинарным и турбулентным).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-01-00361, 17-08-0115.

**Симпозиум «БИОМЕХАНИКА»**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УСИЛИЙ МЫШЦ И РЕАКЦИЙ ГОЛЕНОСТОПНОГО И ПЛЮСНЕФАЛАНГОВОГО СУСТАВОВ ЧЕЛОВЕКА В ПОЗЕ НА ЦЫПОЧКАХ

**Ю.В. Акулич, Н.В. Поздин**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

y.akulich@yandex.ru

Метод перемещений позволяет решить проблему статической неопределимости равновесия системы абсолютно твердых тел с упругими односторонними связями, дополняя систему уравнений статики соотношениями упругости связей. В статических задачах биомеханики костно-мышечной системы предлагается использовать новую модель скелетной мышцы как сухожильно-мышечного комплекса, содержащего активную часть (область мышцы, сжимаемой саркомерами) и участки пассивного растяжения (два сухожилия и часть мышцы, состоящая из растянутых элементов саркомеров). В докладе излагается методика определения параметров этой модели и результаты расчета указанных в заглавии сил.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

## КОРРЕКЦИЯ НЕЙРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ВЗОРА В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛЕТА

**В.В. Александров [1], Т.Б.Александрова [1], Д.И. Бугров [1], К.В.Тихонова [1], Н.Э.Шуленина [1], Э.Сото [2], И.С.Коноваленко [2]**

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

[2] *Автономный университет штата Пуэбла, Мексика*

vladimiralexandrov366@hotmail.com

В докладе рассмотрена задача коррекции нейронного управления установкой взора в сложных условиях полета. Представлена математическая модель биосенсора углового ускорения, проведен анализ этой модели. Показано, что биосенсор имеет особый режим функционирования — режим ожидания механического воздействия, и в этом случае представляет собой бистабильную систему. Тогда с помощью дополнительного воздействия — гальванической вестибулярной стимуляции — можно решать задачу о переводе сенсора из области ожидания механического воздействия в область генерации информационного ответа и обратно. Проведенные в России и Мексике эксперименты подтверждают возможность коррекции.

## МИКРОГИДРОДИНАМИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ДИСПЕРСИЙ

**А.Т. Ахметов [1,2], А.А. Рахимов [1], А.А. Валиев [1]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

alfir@anrb.ru

Физическое моделирование течения эритроцитов и раковых клеток в сосудистой системе с использованием возможностей мягкой фотолитографии позволяет изучить микрогидродинамику биологических дисперсий в условиях близких к реальным. Обнаружено влияние анизотропии эритроцитов при активном течении в микроканале с сужением на структуру течения крови и её скорость. Микрофлюидные устройства позволяют изучать как миграционные свойства раковых клеток при хемотаксисе, так и выделение кластеров, и их проникающих особенностей через капилляры.

Исследование частично выполнено за счет средств государственного бюджета по госзаданию на 2019-2022 годы (№ 0246-2019-0052) и гранта РФФИ (№18-01-00779 А).

## МОДЕЛИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА В ЗАДАЧАХ ОФТАЛЬМОЛОГИИ

**С.М. Бауэр, Е.Б. Воронкова, Л.А .Венатовская**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

s.bauer@spbu.ru

Построены модели, описывающие деформацию внешней оболочки глаза - склеры и изменения внутриглазного давления (ВГД) после введения определенного объема инъекций в стекловидное тело. При этом абсолютное значение изменения показателей ВГД, полученных до и сразу после инъекций, зависит не только от объема введенного препарата, параметров оболочки глаза, но и от типа тонометра, применяемого в клинической практике. Проведены оценки изменения тонометрического ВГД, полученные на основании математических моделей, построенных для нескольких типов тонометра. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00832-а.

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СТОПЫ ПРИ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ И КОРРЕКЦИИ

**П.И. Бегун[1], И.В. Кондратенко[1], Е.А. Лебедева[2], О.В. Тихоненкова [2]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург*

petrbegun1114@mail.ru

Работа выполнена в развитие интегрального метода биомеханических исследований состояния органов и структур человеческого организма. Проведены биомеханические исследование состояния структур стопы при патологии и при коррекции вальгусной деформации пальца стопы. Для достижения цели решены следующие задачи: 1. Создана геометрическая компьютерная модель стопы на основе снимков компьютерной томографии; 2. В геометрическую компьютерную модель, внедрены связки; 3. Созданы компьютерные модели винтов для фиксации отломков при коррекции вальгусной деформации стопы; 4. Проведены исследования напряженно – деформированного состояния стопы при патологии и после коррекции стопы разными методами остеотомии.

## ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА БЕДРЕННУЮ КОСТЬ С ИЗОЭЛАСТИЧЕСКИМ И ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИМ ИМПЛАНТАТОМ

**С.М. Босяков [1], М.А. Николайчик[1], А.Л. Матвеев [2]**

*[1] УО «Белорусский государственный университет», Минск*

*[2] Новокуйбышевская центральная городская больница, Новокуйбышевск*

Nikolaitchik.m@gmail.com

Падение несущей способности трубчатых костей, вызванное остеопорозом или опухолеподобными поражениями, является показателем для применения профилактической имплантации металлоконструкциями в определенных областях бедренной кости. Целью данного исследования является оценка предельной нагрузки на бедренную кость под действием собственного веса человека после установки телескопического или изоэластического интрамедуллярного имплантата в диафизарном отделе на основе конечно-элементного моделирования. Физико-механические свойства кортикальной костной ткани нелинейно изменяются вдоль анатомической оси бедренной кости. Определение предельной нагрузки выполнено с использованием параметра поврежденности конечного элемента.

Работа выполнена в рамках задания 1.8.01.1 «Разработать математические модели и методы решения новых классов краевых задач механики сплошных сред применительно к актуальным современным проблемам науки и техники» Государственной программы научных исследований «Конвергенция».

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СОКРАТИТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ МИОКАРДА

**К.А. Бутова[1,2], О.Н. Лукин [1,2]**

[1]*Институт иммунологии и физиологии УрО РАН, Екатеринбург*

[2]*Уральский Федеральный университет, Екатеринбург*

butchini@mail.ru

Разработаны биомеханические тесты для оценки влияния параметров динамической деформации на сократительную способность миокарда. Выявлено существенное влияние числа и амплитуды циклов воздействия на сократительный ответ сразу после прекращения воздействия и в ходе медленного изменения сократимости до достижения стационарной силы. Эти эффекты значительно выражены только в условиях квазифизиологической частоты стимуляции. Вариация преднагрузки и длительности одиночного воздействия являются факторами, слабо меняющими способность миокарда к силогенерации. Работа выполнена в рамках госзадания ИИФ УрО РАН (НИОКТР №АААА-А18-118020590031-8) и при поддержке гранта РФФИ № 18-04-00572-а.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ОБЛАСТЯХ, БЛИЗКИХ К РЕАЛЬНОЙ АНАТОМИИ

**Ю.В. Василевский[1,2,3] , А.А. Данилов [1,2,3] , С.С. Симаков [2,3]**

[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва*

[2]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

[3]*Сеченовский университет, Москва*

yuri.vassilevski@gmail.com

Персонализированные численные модели основаны на дискретных геометрических моделях, которые задаются анатомически корректными расчетными сетками. В работе рассматриваются методы построения таких сеток и их применение для четырех биомедицинских приложений: неинвазивная оценка гемодинамической значимости стенозов коронарных артерий, моделирование электроимпедансной диагностики, моделирование ультразвуковой диагностики, моделирование кровотока в левом желудочке сердца.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-01-00886, 18-00-01524, 18-31-20048.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВИРУЕМЫХ ДЕФОРМАЦИЕЙ ТОКОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО ДЕФОРМИРУЕМОМ МИОКАРДЕ

**И.Н. Вассерман, А.П. Шестаков**

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

igorw@icmm.ru

Построена модель активации каналов при сложном деформировании при следующих предположениях: каналы равномерно распределены по боковой поверхности клетки; каналы реагируют на локальное увеличение площади участка мембраны; формула, в которой используется удлинение вдоль волокна, верна для случая одномерного растяжения вдоль волокна. В качестве примера рассмотрен случай возникновения активируемых деформацией токов при одноосном растяжение поперек волокна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-590002 р_а.

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО МИКРОМАНИПУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОМЕХАНИКИ КЛЕТКИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ ПРЕДНАГРУЗКЕ

**Д.А. Волжанинов[1,2], Т.А. Мячина [1,2], К.А. Бутова [1,2], А.Д. Хохлова [1,2]**

[1]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

[2]*Институт иммунологии и физиологии УрО РАН, Екатеринбург*

volzhaninovdenis@yandex.ru

В работе представлена методика четырёх карбоновых волокон для изучения сократительной функции (амплитуды пассивной и активной составляющей силы, и временного хода силогенерации) одиночных клеток сердечной мышцы при управляемой преднагрузке. Экспериментальная установка состоит из четырёх цифровых микроманипуляторов, позволяющих задать уровень преднагрузки с высокой точностью, и оптической системы, позволяющей оценить длину и силу сокращающейся клетки.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-949.2019.4.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ВЕНОЗНОГО КЛАПАНА

**Я.А. Гатаулин[1,2], А.Д. Юхнев[1,2], Д.А. Росуховский[2]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

[2] ФГБНУ «*Институт экспериментальной медицины», Санкт-Петербург*

yakov_gataulin@mail.ru

В работе приводятся результаты численного исследования течения в симметричной модели венозного клапана. В центре внимания – анализ поля скорости и застойной области. Застойная область за клапаном представляет большой практический интерес для врачей-флебологов с точки зрения мест потенциального образования тромбов. Построенная упрощенная модель венозного клапана дала хорошее качественное совпадение с клиническими ультразвуковыми данными по положению створок и застойной области за клапаном.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА СЕРДЦА С ПУЛЬСИРУЮЩИМ КРОВОТОКОМ

**А.Н. Гильманов[1], Г. Столярский [1], Ф. Сотиропулос [2]**

[1]*University of Minnesota, USA*

[2]*Stony Brook University, USA*

gilmanov.anvar@gmail.com

Представлена численная методология моделирования задач гидроупругости с тонкими гибкими телами в несжимаемой жидкости. Метод погруженной границы в сочетании с моделью конечных элементов для тонких эластичных оболочек позволяет эффективно решать задачи гидроупругости со сколь угодно большими деформациями. Моделирование взаимодействия гибких лепестков сердечного клапана с пульсирующим кровотоком выполнено для двух типов клапанов: трехстворчатого аортального клапана (ТАК) здорового пациента и двустворчатого аортального клапана (ДАК) пациента с врожденным пороком сердца. Результаты расчетов показывают существенные различия между гемодинамикой потоков в аорте с ТАК и ДАК.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОСТНОЙ ТКАНИ ПО ДАННЫМ INVIVO

**А.А. Голядкина, Д.В. Иванов, И.В. Кириллова, Л.Ю. Коссович, А.С. Фалькович, П.О. Дмитриев**

*Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

nano-bio@sgu.ru

Персонифицированное биомеханическое моделирование элементов опорно-двигательного аппарата невозможно без учета индивидуальных механических свойств. Метод исследования механических свойств на растяжение-сжатие тканей в данной ситуации неприменим. В связи с этим возникает задача определения механических свойств костной ткани по данным медицинского диагностического оборудования. Для этого для 50 образцов губчатой костной ткани выполнены компьютерные томограммы и затем натур-

ные эксперименты на одноосное сжатие. Это позволило разработать формулу для вычисления персонифицированного модуля Юнга по осредненным числам Хаунсфилда, соответствующим плотности костной ткани на компьютерной томограмме.
Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований (договор № 6/130/2018-2021).

## ЭНДОТЕЛИАЛЬНЫЙ ГЛИКОКАЛИКС КАК ПЕРВИЧНЫЙ МЕХАНОРЕЦЕПТОР

**И.В. Гончар[1,2], С.А. Балашов[2], И.А. Валиев[1], О.А. Антонова[2], В.В.Ермишкин[2], А.М. Мелькумянц[1,2]**
[1]*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*
[2]*Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии МЗ РФ, г. Москва*
artmelk@gmail.com

Увеличение напряжения сдвига на стенке приводит к расширению сосудов. В опытах на сонных артериях кролика и на культуре эндотелиоцитов мы показали, что расширение артерий при увеличении напряжения сдвига и ориентация эндотелиоцитов параллельно скорости потока жидкости реализуется только при интактном гликокаликсе, слое макромолекул, покрывающих мембрану эндотелия. Эти результаты доказывают, что именно эндотелиальный гликокаликс является первичным механорецептором, обеспечивающим способность артерий регулировать своё гидравлическое сопротивление при изменениях напряжения сдвига.
Работа поддержана РФФИ (грант № 16-04-01119).

## РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ СВЯЗИ КОМПОНЕНТОВ ПОКРЫТИЯ ИМПЛАНТА С ТИТАНОМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ И МЕТОДОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ (ПАКЕТ GAUSSIAN 0.9)

**И.Н. Дашевский**
*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
dash@ipmnet.ru

Один из способов улучшения сращивания имплантата с костью – нанесение биосовместимых покрытий, в частности, гидроксиапатита (HAp). Важно оценить прочность сцепления HAp с имплантатом. Мера прочности связи покрытия с подложкой - это энергия этой связи. С использованием теории функционала плотности и молекулярной динамики рассчитываются путь реакции, продукты реакции, частоты колебаний, энергии активации и энергии связи между различными комбинациями компонентных анионов HAp и Ti (II) – стандартного материала имплантатов.
Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310386-3) и при частичной поддержке грантов РФФИ №17-08-01579 и №17-08-01312.

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРСОНИФИЦИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕНТАЛЬНЫХ РЕСТАВРАЦИЙ НА ИМПЛАНТАТАХ

**И.Н. Дашевский, Д.А. Грибов**
*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
dash@ipmnet.ru

Рассматривается технология персонифицированного компьютерного планирования восстановления зубного ряда беззубой нижней челюсти с использованием дентальных имплантатов. Модель челюсти и распределение упругих модулей по ее объему реконструируются на основе компьютерной томограммы, дополняется виртуальными имплантатами и моделью протезной структуры и передается в КЭ комплекс, в котором задаются условия нагружения (откусывание, жевание) и закрепления. Проводится сравнение двух схем протезирования.
Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310386-3) и при частичной поддержке грантов РФФИ №17-08-01579 и №17-08-01312.

## ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЯ ИМПЛАНТАТА С ТВЕРДЫМИ ТКАНЯМИ ЗУБА

**М.В. Джалалова [1], А.Г. Степанов [2]**
[1]*Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
[2]*Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова, Москва*
margarita-vd@mail.ru

Исследовалась адгезионная прочность статической нагрузкой на разрыв стоматологических цементных соединений индивидуального фрезерованного трансдентального имплантата с твердыми тканями корня зуба: определена наилучшая искусственная шероховатость поверхностей имплантатов, которые обрабатывались пескоструйной машиной (Renfert, Германия) под давлением 2 атм порошком оксида алюминия с размером зерен 50, 150 и 250 мкм и оптимальная толщина цементной пленки, подтвержденная компьютерным моделированием процесса вытягивания прототипа циркониевого имплантата из образца корня зуба с различными толщинами цементного соединения. Обработанные образцы изучались в нано-лаборатории (Троицк, Россия) с помощью атомно-силового микроскопа.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА БИОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИРУРГИЧЕСКОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА ПОСЛЕ ТРАВМ ПОЗВОНОЧНИКА

**А.М. Донник**

*ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Саратов*

donnikam@info.sgu.ru

Выполнено биомеханическое моделирование сегмента Th10-S позвоночника с переломом тела позвонка Th12. Промоделированы два этапа хирургического реконструктивного вмешательства. На первом этапе зафиксированы тела позвонков Th11 и L1 с помощью двух пар винтов и двух стержней, соединяющих их. На втором этапе на уровне поврежденного позвонка Th12 установлен межтеловой заменитель MESH. Выполнены численные эксперименты по нагружению моделей с металлоконструкциями. Оценены эквивалентные напряжения в костной ткани и в металлоконструкциях. Показана необходимость второго этапа хирургического вмешательства.

Работа выполнена в рамках проекта «Протез-1» Фонда перспективных исследований, договор № 6/130/2018-2021.

## О СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ПО ПОВЕРХНОСТИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

**А.И. Дьяченко[1,2,3], М.В. Веремьева [1], Е.С. Фомина [4]**

[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

[2]*ГНЦ РФ - Институт медико-биологических проблем РАН, Москва*

[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва*

[4]*ООО «МегаМед Корпорэйшн», Москва*

alexander-dyachenko@yandex.ru

Найдены скорости распространения упругих волн по поверхности грудной клетки человека вдоль и поперек ориентации ребер. В эксперименте принимало участие 10 здоровых добровольцев мужского пола в возрасте 19-22 лет. С помощью макета аппаратно-программного комплекса регистрировали вибрации ударника-вибратора и легкого акселерометра, контактирующих с грудной клеткой. Вычислили передаточную функцию прохождения вибраций по грудной клетке. Используя фазовый метод (зависимость фазы передаточной функции от частоты), нашли скорости распространения волн. Обнаружены статистически значимые отличия скоростей вдоль и поперек ориентации ребер в диапазонах частот от 27 до 100 Гц и от 100 до 200 Гц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-01-06246.

## ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**А.А. Киченко**

*Пермский национально-исследовательский политехнический университет, Пермь*

kichenko.alex@inbox.ru

Губчатая костная ткань является пористым анизотропным материалом, структурные особенности которого можно описать при помощи тензора структуры. Осуществлена постановка начально-краевой задачи о перестройке губчатой костной ткани, разработан алгоритм её решения и на ряде примеров показана перестройка губчатой кости. Результаты показывают различный характер влияния изменения нагрузки на процесс формирования структуры и соответствуют закону Вольфа. Предложена модель перестройки губчатой костной ткани для нижней челюсти, для заданных условий нагружения получено НДС, пористость и график ориентации трабекул в ветви челюсти.

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО БЛОКА И ТЕЛА СИСТЕМЫ ВИДЕОАНАЛИЗА

**П.А. Кручинин, В.В. Латонов, Д.С. Матвеев**

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва*

pkruch@mech.math.msu.su

Обсуждается два алгоритма определения матрицы относительной ориентации инерциального блока и тела системы видеоанализа. Решение этой задачи необходимо для дальнейшей совместной обработки данных этих сенсоров в биомеханических исследованиях. Первый алгоритм предполагает ортогональность приборных осей инерциального блока, второй не использует априорной информации об осях приборного трехгранника. В этом случае проводится повторная калибровка блока акселерометров. Обработка результатов пробного эксперимента показала, что для недорогих МЭМС второй алгоритм дает более устойчивые результаты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-00-01590.

## ОБ УЧЕТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГОЛЕНОСТОПНОГО СУСТАВА В МОДЕЛИ УДЕРЖАНИЯ ЧЕЛОВЕКОМ РАВНОВЕСИЯ НА ПОДВИЖНОЙ ОПОРЕ В ВИДЕ ПРЕСС-ПАПЬЕ

**П.А.Кручинин, Р.М.Сакаев**

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва*

pkruch@mech.math.msu.su

Тесты, связанные с удержанием человеком равновесия на подвижной опоре в виде пресс-папье (на качелях сисо), используются при исследовании регуляции позы. В докладе рассмотрена простейшая «маятниковая» модель человека, стоящего на сисо. Управлением является момент в оси вращения перевернутого маятника. Управление строится в виде обратной связи по единственной неустойчивой координате разомкнутой системы. Оно максимизирует область притяжения линейной системы, при наличии ограничения на абсолютную величину управляющего момента. Рассмотрены параметры движения системы в зависимости от расположения оси маятника.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-00-01590.

## БИОМЕХАНИКА ПРОКСИМАЛЬНОГО ПЕРЕХОДНОГО КИФОЗА ПРИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

**А.Л. Кудяшев[1], В.В. Хоминец[1], А.В. Теремшонок[1], К.Е. Коростелев[1], Е.Б. Нагорный[1], А.В. Доль[2], Д.В. Иванов[2], И.В. Кириллова[2], Л.Ю. Коссович[2]**

[1]*Кафедра и клиника военной травматологии и ортопедии Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург*

[2]*Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

nano-bio@sgu.ru

Транспедикулярная фиксация считается наиболее эффективным методом лечения пациентов с заболеваниями и травмами позвоночника, требующими стабилизации и коррекции. Этот способ фиксации нередко связан с риском быстрого развития дегенеративно-дистрофических изменений в позвоночно-двигательных сегментах, располагающихся выше уровня фиксации. Это так называемый проксимальный переходный кифоз. В данном исследовании выполнена серия биомеханических расчетов с целью выявления механических факторов, приводящих к формированию проксимального переходного кифоза, и обоснования необходимости соблюдения оптимального сагиттального позвоночно-тазового баланса при выполнении коррекции и фиксации позвоночника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований (договор № 6/130/2018-2021).

## СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ КРОВЕНОСНОГО СОСУДА

**А.А. Кузин [1], Р.А. Кузин [2], Ш.В. Тимербулатов [3], С.А. Улемаева [4], А.Г. Хакимов [5]**

[1] *Городская клиническая больница № 8, Уфа*

[2] *Медицинский информационно - аналитический центр, Уфа*

[3]*Башкирский государственный медицинский университет, Уфа*

[4]*Республиканский клинический противотуберкулезный диспансер, Уфа*

[5]*Институт механики им.Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

hakimov@anrb.ru

Рассматривается взаимное влияние изгиба кровеносного сосуда, внутреннего и внешнего давления, действия сжимающей силы и течения крови по кровеносному сосуду. Получено критическое значение сжимающей кровеносный сосуд силы, которое представляет собой обобщение классического критического значения сжимающей кровеносный сосуд силы в задаче Эйлера за счет действия давлений внутри и вне кровеносного сосуда, движения крови внутри кровеносного сосуда. Изгибная жесткость кровеносного сосуда, растягивающие силы, внешнее гидростатическое давление стабилизируют, а сжимающие силы, внутреннее гидростатическое давление, движение крови с любой скоростью внутри кровеносного сосуда дестабилизируют его.

Работа выполнена по госзаданию на 2019-2022 годы (№0246-2019-0088).

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОРОУПРУГОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СЖАТИЕ ЭЛЕМЕНТА МИОКАРДА

**Д.В. Кучеренко, М.В. Вильде**

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

denismbl@mail.ru

В настоящей работе исследуется возможность применения пороупругой модели к описанию механического поведения сердца. Был проведён ряд экспериментов на сжатие элементов миокарда с циклическим приложением нагрузки и разгрузки. Полученный в результате эксперимента гистерезис в σ-ε плоскости аппроксимировался эллипсом с той же площадью, что позволило учесть диссипативные характеристики образца. На основании пороупругой модели было выполнено теоретическое моделирование эксперимента с выбором определённых феноменологических коэффициентов, свойственных мышцам.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ПО УСТАНОВКЕ ПОТОК-ПЕРЕНАПРАВЛЯЮЩЕГО СТЕНТА В ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ СОСУДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

**Ю.О. Куянова [1,2], Д.В. Паршин [1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

july9696@mail.ru

Настоящее исследование посвящено применению численного 3D-моделирования церебральной гемодинамики в приложении к реальным операциям по установке потокоперенаправляющего стента в церебральные сосуды с аневризмой. Рассматриваются различные геометрические подходы к моделированию стента с применением модели пористой среды. Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ 14.W03.31.0002.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ КЛЕТОЧНЫХ ДВИЖЕНИЙ В СРЕДЕ, ОБРАЗОВАННОЙ КЛЕТКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

**С.А. Логвенков[1,2], А.А. Штейн [2]**

[1]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

[2]*Институт механики московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва*

logv@bk.ru

Разработана континуальная модель биологической сплошной среды, состоящей из клеток двух различных типов. Ключевой особенностью модели является постулирование определяющих соотношений для активных напряжений и скоростей деформаций клеточных фаз, учитывающее различный характер взаимодействий как внутри одного типа клеток, так и между клетками разных типов. Свойства модели исследованы на примере решения задач о разделении двух популяций клеток в плоском бесконечном слое. Рассмотрены три постановки задачи: (1) слой не нагружен; (2) толщина слоя фиксирована; (3) на поверхности слоя действует демпфирующая сила, величина которой пропорциональна скорости изменения его толщины.

## БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАРУШЕНИЙ ПРИКУСА НА СОСТОЯНИЕ ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

**А.О. Мазалова, В.Н. Никитин, В.М. Тверье, Ю.И. Няшин**

*Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь*

efemera2012@yandex.ru

Шейная мускулатура находится в тесной связи со стоматогнатической системой, что обусловливает частоту возникновения проблем в данной области. Для диагностики у пациентов с нарушениями прикуса стоматологами-ортодонтами часто используется методика расшифровки снимков телегентгенографии, в которой не учитывается положение шейного отдела. В данной работе была проведена аппроксимация экспериментальной кривой, характеризующую кривизну шейного отдела на телегентгенограммах, что в дальнейшем позволит определить зависимость нарушений прикуса от состояния шейного отдела.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00589 и при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЦЕТАБУЛЯРНОГО КОМПОНЕНТА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА

**И.Л. Маслова [1], П.В. Суркова [1], Л.Б. Маслов[1,2]**

[1]*Ивановский государственный энергетический университет, Иваново*

[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

maslov@tipm.ispu.ru

Целью работы является исследование напряженного состояния системы «скелет - эндопротез тазобедренного сустава» при двухопорном стоянии для двух значений силы затяга винтов эндопротеза: номинальной и критической. В результате расчетов показано, что максимальные напряжения возникают в винтах и костях. Винты и эндопротез имеют высокий запас прочности. Кортикальный слой костей таза удовлетворяет условиям прочности. Коэффициент запаса губчатой ткани стремится к единице, что может привести к локальному разрушению костей. Однако при ограничении силы затяга номинальной величиной, реконструкция тазобедренного сустава с помощью индивидуального эндопротеза имеет хорошие биомеханические характеристики.

## ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА В ПОЛНОМ БРОНХИАЛЬНОМ ДЕРЕВЕ ЧЕЛОВЕКА В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ

**А.Е. Медведев[1,2], П.С. Гафурова [1,2]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

medvedev@itam.nsc.ru

Работа посвящена математическому моделированию течения воздуха в бронхиальном дереве человека в норме и при патологии. Приведены аналитические формулы для построения бронхиального дерева с учетом нецилиндричности внутренней поверхности

бронхов при патологии. Все поверхности бронхиального дерева состыковываются со вторым порядком гладкости (не имеют острых углов и ребер). Впервые проведены расчеты течения по все длине бронхиального дерева человека вплоть до альвеол. Показано, что ламинарное течение в бронхиальном дереве дает в два меньший перепад давления по сравнению с турбулентным течением.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-41-540003.

## ИМПЛАНТИРУЕМАЯ СИСТЕМА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ СЕРДЦА (LVAD) НА ОСНОВЕ ДИСКОВОГО НАСОСА ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ

**А.Е. Медведев[1,2], В.М. Фомин [1,2], А.М. Караськов [3], А.М. Чернявский [3]**

[1]*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*Национальный медицинский исследовательский центр им. ак. Е.Н. Мешалкина, Новосибирск*

medvedev@itam.nsc.ru

Разработан и изготовлен имплантируемый дисковый насос поддержки кровообращения. Данный насос предназначен для имплантации больным для временной (до нескольких лет) поддержки работы сердца на период ожидания донорского сердца. Разработанный насос отличается от существующих насосов принципом работы, основанном на явлении пограничного слоя, который образуется на вращающихся дисках. Дисковый насос отличается от существующих меньшей скоростью вращения ротора и вследствие этого обладает меньшей тромбогенностью. Дисковый насос удовлетворяет всем медико-биологическим требованиям для имплантируемых насосов поддержки кровообращения и прошел успешные испытания на лабораторных животных.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОНОМЕТРА ШИОТЦА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ В ГЛАЗАХ С ИСКУССТВЕННО СОЗДАННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ РОГОВИЦЫ

**И.Н. Моисеева, А.А. Штейн**

*Институт механики МГУ, Москва*

moiseeva.ir@yandex.ru

Проанализирована возможность использования формул, применяемых при стандартной обработке данных тонометрии по Шиотцу, для глаз с искусственно созданной неоднородностью упругих свойств роговицы. Роговица рассматривается как упругая безмоментная изотропная поверхность. Неоднородность ее упругих свойств и толщины описывается зависимостью эффективной жесткости от положения на меридиональной дуге. Результаты составляют базу для создания рекомендаций врачам, выполняющим тонометрию оперированного глаза. При ослаблении периферической зоны роговицы учитывать ее неоднородность нужно только при очень высоких внутриглазных давлениях.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00380.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ВИСОЧНО-НИЖНЕЧЕЛЮСТНОГО СУСТАВА И МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ПРИКУСА

**В.Н. Никитин, В.М. Тверье, Ю.И. Няшин**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

nikitinvladislav86@gmail.com

В работе определятся мышечные усилия и реакции височно-нижнечелюстных суставов, которые влияют на распределение напряжений и деформаций в костной ткани нижней челюсти и суставных дисках. Определение усилий мышц обычно производится с использованием гипотезы, что точка приложения реакции принадлежит поверхности контакта мыщелка с диском и отрезку, который берет начало из данной точки и отсчитывается по нормали в самом узком месте суставной щели. В настоящей работе усилия мышц и реакции височно-нижнечелюстных суставов определяются без использования этой гипотезы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00589 и при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

## РОЛЬ БИОМЕХАНИКИ В РАЗВИТИИ ЦИФРОВОЙ МЕДИЦИНЫ

**Ю.И. Няшин, С.Е. Пешин**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

Sapeshin@yandex.ru

Данная работа является продолжением идей Эрвина Семёновича Бауэра. Великий биолог говорил о том, что в человеке все системы работают взаимосвязано. В частности, зубочелюстная система имеет непосредственную связь с нервной системой посредством жевательных мышц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00589 и при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

## ИЕРАРХИЯ МОДЕЛЕЙ ГИПЕРУПРУГОГО МАТЕРИАЛА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МАТЕРИАЛА СТЕНКИ ЦЕРЕБРАЛЬНОЙ АНЕВРИЗМЫ

**Д.В. Паршин [1,2], А.И. Липовка[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

lipovkaai@yandex.ru

В работе приводятся результаты экспериментального исследования одноосного нагружения стенок церебральных аневризм, а также математическое моделирование на основе полученных экспериментальных данных. В качестве моделей материала были выбраны гиперупругие материалы Муни-Ривлина (3х и 5ти параметрические) и модель Йо. Показно, что модели Муни-Ривлина обладают хорошими аппроксимирующими способностями, до 1.5 раз выше по сравнению с моделью Йо. Полученные результаты могут служить хорошей базой для выбора гиперупругих моделей стенки аневризм в задачах пациент-специфического гидроупругого 3D-моделирования гемодинамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ, проект №14.W03.31.0002.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПОМОЩИ РАБОТНИКАМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**А.В. Подопросветов[1], Д.А. Анохин [2], И.А. Орлов [1], А.П. Алисейчик [3]**

[1]*ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

[2]*РГГУ, Отделение интеллектуальных систем в гуманитарной сфере, Москва*

[3]*ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

llecxis@gmail.com

В работе описано исследование, целью которого является создание комплекса программно-аппаратных средств для распознавания движений человека на основе инерциальной информации в условиях производства. Полученную систему планируется использовать для распознавания и предугадывания целевых движений работников, занимающихся физической деятельностью на различных предприятиях, в частности, в условиях конвейерного производства. Исследование позволит заложить основу для создания интеллектуальной системы управления экзоскелетами, применяемыми для снижения вреда здоровью работников промышленных предприятий.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-71-10112.

## К ВОПРОСУ О КЛЕТОЧНОЙ МИГРАЦИИ

**А.А. Рахимов[1], А.Т. Ахметов [1,2], А.А. Валиев [1], К.В. Данилко [3], С.П. Саметов [4], С.Ф. Урманчеев [1], Д.Б. Хисматуллин [1,5]**

[1]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

[3]*Башкирский государственный медицинский университет, Уфа*

[4]*РН-БашНИПИнефть, Уфа*

[5]*Тулейнский университет, Новый Орлеан*

ragar83@mail.ru

В работе представлены экспериментальные и теоретические аспекты изучения миграции, при взаимодействии с химическим веществом – аттрактантом, раковых клеток DU145 через узкие микроканалы в разработанной нами миграционной микрофлюидной системе. Характер миграции зависит от ширины канала и расположения клеток. Рассмотрена математическая модель концентрационно-капиллярного движения, которая представляет собой систему уравнений динамики несжимаемой вязкой жидкости, записанной по отдельности для содержимого клетки и для окружающей её среды. Исследование частично выполнено за счет средств государственного бюджета по госзаданию на 2019-2022 годы (№ 0246-2019-0052) и гранта РФФИ (№18-01-00779 А).

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИИ ГИПЕРУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

**В.Ю. Саламатова**

*Сеченовский университет, Москва*

salamatova@gmail.com

В данной работе описан конечно-элементный метод решения трехмерных задач нелинейной теории упругости в рамках конечных деформаций для гиперупругого материала. Отличительной особеннностью данного подхода является компактная форма уравнений, что приводит к уменьшению объема вычислений и позволяет достаточно просто реализовать широкий спектр определяющих соотношений для гиперупругой модели. Рассмотрены определяющие соотношения, записанные с использованием полярного разложения градиента деформаций и верхнетреугольного (QR) разложения градиента деформаций.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-71-10102.

## ПРИЛОЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ АРИТМИИ НА НАСОСНУЮ ФУНКЦИЮ СЕРДЦА

**Ф.А. Сёмин [1,2], А.Ш. Осепян [3]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Российский университет дружбы народов, Москва*

[3]*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

f.syomin@imec.msu.ru

В работе представлены результаты моделирования гемодинамических эффектов нарушений ритма сердечных сокращений с помощью новой многомасштабной модели механики левого желудочка сердца, включённого в систему кровообращения. Показано влияние атриовентрикулярной блокады и мерцательной аритмии на производительность сердца и основные характеристики гемодинамики. Приведены результаты расчётов, показывающие усиление эффектов такого рода аритмий, а также эффектов стеноза митрального клапана при учащённом сердцебиении под физической нагрузкой. Часть этих эффектов согласуется с данными наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00065.

## МНОГОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИКИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА В СИСТЕМЕ КРОВООБРАЩЕНИЯ

**Ф.А. Сёмин [1,2], А.Ш. Осепян [3], А.Р. Хабибуллина [3], А.К. Цатурян [1]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Российский университет дружбы народов, Москва*

[3]*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

f.syomin@imec.msu.ru

В докладе представлена новая модель сердечно-сосудистой системы, основанная на многомасштабной модели левого желудочка сердца, содержащей описание кинетики процессов, происходящих на уровне мышечной клетки. Предсердия и правый желудочек рассматриваются как вязко-упругие резервуары, упругие свойства которых зависят от времени и объёма. Кровеносное русло описано моделью с сосредоточенными параметрами и включает как большой, так и малый круги кровообращения. Приведены результаты численного моделирования сердечного цикла со значениями параметров, характерных для здорового сердца человека и при некоторых кардиомиопатиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00065.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ КРОВОТОКА В МОДЕЛИ БИФУРКАЦИИ БРЮШНОЙ АОРТЫ

**Д.Э. Синицына[1], А.Д. Юхнев[1], Я.А. Гатаулин[1], Е.М. Смирнов[1], Д.К. Зайцев[1], Р.И.Кирсанов[2], В.П.Куликов[3]**

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

[2]*Алтайский государственный медицинский университет, Барнаул*

[3]*Алтайский медицинский институт последипломного образования, Барнаул*

sinicina.daria@yandex.ru

Численным методом исследуется структура потока в модели участка сосудистого русла, включающего область бифуркации брюшной аорты, а также общие, наружные и внутренние подвздошные артерии. Установлено, что для кровотока во всех подвздошных артериях характерно формирование пары продольных вихрей, и только в фазу обратного расхода во внутренних подвздошных артериях наблюдается одновихревое течение.Область входа в бифуркацию брюшной аорты, а также наружные подвздошные артерии характеризуются малостью средних по времени сдвиговых напряжений и большими значениями индекса пульсаций напряжений. Это дает основание полагать указанные области наиболее вероятными для развития стеноокклюзирующих поражений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №18-01-00629А.

## ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ЗАКРУЧЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ КРОВИ В КРУПНОМ СОСУДЕ

**И.Н. Солдатов [1], Н.В. Клюева, Г.Ф. Русановская**

[1]*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

igorsdtv@yandex.ru

Динамика течения артериальной крови играет важную роль в развитии и течении заболеваний крупных сосудов. Рассмотрено периодическое закрученное движение крови в крупном сосуде на основе модели вязкой микрополярной жидкости. Артериальный сосуд моделируется круговым цилиндром с упругоподатливой стенкой. Исследованы дисперсионные свойства и коэффициенты затухания осесимметричных мод.

## МЕХАНО-КАЛЬЦИЕВОЕ И МЕХАНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРЯЖЕНИЕ В МИОКАРДЕ В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

**О.Э. Соловьева**

*Институт иммунологии и физиологии УрО РАН, Екатеринбург*

*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

o.solovyova@iip.uran.ru

Электромеханическое сопряжение (ЭМС) в сердце связывает процессы электрического возбуждения и сокращения миокарда на клеточном и тканевом уровнях. Ключевую роль в ЭМС играет кинетика внутриклеточного кальция. В контуре ЭМС имеет место обратная связь – влияние механики на динамику кальция и электрическое возбуждение. Эти связи важны для регуляции функции сердечной мышцы в норме и проявляются при ее нарушениях. В докладе будут представлены экспериментальные данные о биомеханике сердечной мышцы в норме и при сердечной недостаточности и представлена новая биомеханическая модель электромеханической активности миокарда человека, в которой учтены обратные механо-кальциевые-электрические связи. Будут проанализированы механизмы нарушения функции миокарда при старении.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-015-00368.

## БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ КАК ФАКТОР УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ЗУБОЧЕЛЮСТНОЙ СИСТЕМОЙ ЧЕЛОВЕКА

**В.М. Тверье**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

tverier_55@perm.ru

Зубочелюстная система является комплексной многоуровневой структурой, обеспечивающей не только процессы питания, но и дыхания, речи, слуха, а также влияющая на кровоснабжение головного мозга.Управляющим фактором, обеспечивающим сохранение состава и структуры зубочелюстной системы и ее блоков, поддержание режима деятельности, является биомеханическое давление (механические напряжения).Выделение управляющего фактора позволило поставить и решить биомеханические задачи коррекции прикуса, построить модели естественного и искусственного вскармливания, построить пороупругую модель диска височно-нижнечелюстного сустава, а также разработать новые кинетические уравнения перестройки костной ткани.

Биомеханическое моделирование выполнено при поддержке гранта РНФ № №18-01-00589. Построение новых кинетических уравнений и численная реализация модели перестройки выполнена при поддержке Правительства Пермского края.

## БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ В ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ИЛЬЮШИНА

**В.М Тверье, Т.Н. Чикова**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

tverier_55@perm.ru

В работе рассматривается построение и использование биомеханической модели перестройки трабекулярной костной ткани в пятимерном пространстве А.А. Илюшина, включающей определяющее соотношение S.C. Cowin, которое устанавливает взаимосвязь между тензором напряжений и тензором структуры кости. Полученная В.М. Тверье модель используется для реализации *insilico* задачи о всестороннем сжатии плоского образца из трабекулярной костной ткани. В результате решения такой задачи получена кривая истории формирования структуры.

Теоретическая часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ (18-01-00589–а). Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

**Н.В. Федорова**

*Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

veter-nata@mail.ru

В статье рассматриваются модели керамических стоматологических имплантатов и анатомических элементов челюсти. Определялось напряжённо-деформированное состояние имплантатов для одиночных реставраций в зависимости от формы, угла установки и степени минерализации кости при статическом эксплуатационном нагружении. В расчётах учитывалось качество минерализации кости, меняющейся с возрастом пациента. Выполнялся численный анализ контактного взаимодействия между имплантатом и костными составляющими челюсти, в том числе в области прилегания имплантата к кортикальной кости с учётом форм шейки имплантата.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00361.

## ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КРОВООБРАЩЕНИЯ У ДЕТЕЙ С ВРОЖДЁННЫМ ПОРОКОМ СЕРДЦА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУНТИРОВАНИЯ

**А.Р. Хайрулин [1], А.Г. Кучумов [1], А.А. Породиков [2]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[2]*Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии им. С.Г. Суханова, Пермь*

kychymov@inbox.ru

Показатели детской смертности у детей с врожденным пороком сердца неуклонно растут в России. Одним из хирургических методов лечения врожденных патологий сердца используется шунтирование. Однако хирурги встречаются с множеством факторов, влияющих на успешность операции, для анализа которых необходимо биомеханическое моделирование. На данном этапе реализован этап построения модели течения крови в системе «аорта–шунт». Была отмечена несимметричность течения в легочных артериях при различных местах имплантации. Объективизированный и персонализированный подход к особому лечению каждого конкретного пациента позволит значительно снизить детскую смертность и улучшить качество реабилитации. Исследование выполнено при поддержке правительства Пермского края.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛЯХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ С ПОМОЩЬЮ МРТ

**А.К. Хе[1,2], В.С. Ванина[2], А.А. Черевко[1,2], А.В. Чеботников[1], Д.В. Паршин[1,2], А.А. Тулупов[3,2], А.П. Чупахин[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск*

alekhe@hydro.nsc.ru

В работе исследуется закручивающийся характер движения жидкости в моделях сосудов человека с помощью магнитно-резонансной томографии. Течение жидкости в силиконовых моделях кровеносных сосудов создаётся с помощью программируемого насоса. Разработана программа для обработки данных МРТ, позволяющая визуализировать поток и рассчитывать гидродинамические параметры потока. Реконструирована трёхмерная геометрия моделей и проведены численные расчеты. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-11-01156).

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОНОЧНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО СЕГМЕНТА L4-L5

**Д.В. Хорошев[1], О.Р. Ильялов [1], Н.Е. Устюжанцев [2]**

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

[2]*Пермский государственный медицинский университет им. акад. Е.А. Вагнера, Пермь*

horosh-den@mail.ru

Рассмотрена малоисследованная возможная причинавозникновения боли в позвоночно-двигательном сегменте L4-L5, обусловленная деформированием капсулы фасеточного сустава в сегменте. Цель работы - используя методы биомеханического моделирования показать, что при появлении дегенеративных изменений в позвоночно-двигательном сегменте возникает сублюксация фасеточных суставов и меняется стратегия ведения пациентов (методика лечения). Тестовая упругая задача решена с использованием программного пакета Ansys. Получены распределения перемещений, напряжений и деформаций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕГУЛЯЦИИ МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

**А.К. Цатурян [1], Н.А. Кубасова [1], С.Ю. Бершицкий [2], Г.В. Копылова [2], С.Р. Набиев [2], Д.В. Щепкин [2], А.М. Матюшенко [3], Д.И. Левицкий [3]**

[1]*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт иммунологии и физиологии УрО РАН, Екатеринбург*

[3]*ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологий» РАН, Москва*

tsat@imec.msu.ru

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований механических задач, связанных с регуляцией мышечного сокращения на молекулярном уровне. Показано, что многие характеристики регуляции сокращения мышц ионами $Ca^{2+}$ можно объяснить простой моделью, в которой тропомиозиновый тяж рассматривается как упругий стержень, механически взаимодействующий с другими сократительными и регуляторными белками. Связь между механическими и регуляторными свойствами тропомиозина подтверждается экспериментами с использованием генно-модифицированного Тм и молекулярно-динамическими расчётами.

Работа поддержана комплексным грантом РФФИ № 17-00-00071 (17-00-00065, 17-00-00066 и 17-00-00070).

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАЗНЫХ РЕЦЕПТУР ПОЛИУРЕТАНОВ С МЯГКИМИ ТКАНЯМИ ОРГАНИЗМА

**В.С. Чудинов[1,2], И.В. Кондюрина [3], И.Н. Шардаков [1,2], А.В. Кондюрин [4]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный университет, Пермь*

[3]*Школа медицины сиднейского университета, Сидней*

[4]*Школа физики сиднейского университета, Сидней*

chudinovsl@mail.ru

Сердечно-сосудистые заболевания занимают первое место по смертности среди болезней. Часто для их лечения требуется замещением синтетическими протезами тканей и органов. Однако, при использовании искусственных имплантатов существуют актуальная проблема иммунного ответа организма на внедрение «инородного тела». Одним из требований биосовместимости имплантатов с тканями организма является совместимость их биомеханических свойств. Сертифицированные к применению материалы для кардиоваскулярных имплантатов не удовлетворяют этим условиям. В данной работе синтезированы полиуретаны с разной рецептурой. Исследованы их механические свойства и иммунный ответ на них при имплантации в живой организм.

Работа выполнена при поддержке государственного задания ИМСС УрО РАН.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ ГОЛОВНОГО МОЗГА НА ОСНОВЕ ИНТРАОПЕРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СПЛОШНЫХ СРЕД

**А.П. Чупахин**

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

alexander190513@gmail.com

Дан обзор исследований по гемодинамике головного мозга, выполненных в ИГиЛ СО РАН, Клинике Мешалкина и Федеральном нейрохирургическом центре. Разработана система интраоперационного мониторинга кровотока. Создан экспериментальный стенд для изучения течений жидкости на базе МР сканера PhilipsIngenia 3T. Показано влияние сахарного диабета 1 типа в различных стадиях на кровеносную систему мозга мышей. Построен гемодинамический атлас крупных церебральных сосудов по данным эндоваскулярного мониторинга. Исследована, методами лазерной флуоресценции и численно, реология ткани стенки церебральной аневризмы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-11-01156.

## ВЛИЯНИЕ ГЛАДКОМЫШЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕНКИ В МЕЛКИХ АРТЕРИЯХ

**Н.Х. Шадрина**

*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург*

nkhsh@yandex.ru

Рассмотрена статическая задача о влиянии сокращений гладкомышечных клеток на напряжения в стенке резистивного сосуда. Общее напряжение состоит из пассивной и активной составляющих. Активное напряжение представляется произведением двух функций, аргументом одной из них является линейный параметр, другой – концентрация кальция в гладкомышечных клетках. Обе функциональные зависимости получены с использованием опубликованного экспериментального материала. Показано, что общее напряжение в стенке существенно снижается при сокращении гладких мышц и определяется, главным образом, активной составляющей.

Работа выполнена при поддержке гранта Программы ФНИ ГАН (ГП-14, раздел 64).

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВИСОЧНО-НИЖНЕЧЕЛЮСТНОГО СУСТАВА НА КРОВОСНАБЖЕНИЕ ГОЛОВНОГО МОЗГА

**И.Д. Шитоев, В.Н. Никитин, В.М. Тверье, Ю.И. Няшин**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

Shitoev26@gmail.com

В настоящее время существует большое количество гипотез о влиянии височно-нижнечелюстного сустава на образование изгибов и петлистостей во внутренней сонной артерии, что может привести к недостаточности мозгового кровоснабжения и, как следствие, к инсульту и инфаркту. К сожалению, в литературе на сегодняшний день нет строгого объяснения данного механизма влияния. Все противоречия могут быть устранены путем разработки биомеханической модели воздействия височно-нижнечелюстного сустава на внутреннюю сонную артерию. В данной работе проведена предварительная оценка этого воздействия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00589 и при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЕЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ

**А.А. Штейн, И.Н. Моисеева, Г.А. Любимов**

*Институт механики МГУ, Москва*

stein.msu@bk.ru

Предложен метод учета нелинейности упругого поведения роговицы глаза, позволяющий эффективно оценивать влияние этого фактора на результаты клинических измерений и экспериментов с мертвым материалом. Роговица моделируется однородной изотропной безмоментной упругой поверхностью. Ее упругие свойства определяются неквадратичной зависимостью энергии деформаций от компонент тензора деформаций. Деформации считаются малыми. При максимально простой экспоненциальной форме этой функции появляется лишь один дополнительный параметр по сравнению с линейным случаем.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00380.

## Симпозиум «МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ, ГАЗООБРАЗНЫХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ»

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛЕДЕНЕНИЯ САМОЛЕТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FLOWVISION

**А.А. Аксенов[1], П.М. Бывальцев[1], С.В. Жлуктов[2], К.Э. Сорокин[2], А.А. Бабулин[3], В.И. Шевяков[3]**

[1]*ООО «ТЕСИС», г. Москва*

[2]*ООО «Вычислительная инженерная платформа», Москва*

[3]*АО «Гражданские самолеты Сухого», Москва*

andrey@tesis.com.ru

Рассмотрена математическая модель обледенения поверхностей самолета при его движении в атмосфере, содержащей переохлажденные капли воды. Модель, записанная в эйлеровой постановке, учитывает образование пленки воды и ее растекание по льду и по поверхности самолета, испарение воды и возгонку льда, теплообмен между пленкой воды и атмосферой, льдом и корпусом самолета. Капли задаются в виде спектра по диаметрам. Модель реализована в программном комплексе FlowVision. В докладе представлены валидационные случаи обледенения крыльев самолета, а также представлен расчет обледенения всего самолета.

### МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

**И.А. Амелюшкин [1,2]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Созданы математические модели и численные алгоритмы расчета движения несферических тел в неоднородных средах. Проведены и иллюстративно представлены параметрические исследования, определены управляющие параметры. Разработаны вычислительные алгоритмы и математические модели управления взаимодействием потоков газа и дисперсных систем с твердым телом на молекулярном уровне детализации. Разработаны алгоритмы решения обратных задач определения параметров потоков по данным оптических измерений. Получены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики дисперсных систем в аэродинамических установках. Получены результаты экспериментальны хи теоретических исследований кристаллизации переохлажденной метастабильной жидкости в приложении к проблеме обледенения, обнаружен ряд новых явлений, предложено их объяснение.

Работа выполнена в рамках проекта MUSIC-haic программы HORIZON 2020 ЕС при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП на 2014-2020 (№ RFMEFI62818X0010), и при поддержке РФФИ (№ 18-31-00485).

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОВТОРНЫХ И ДЛИТЕЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

**В.С. Бондарь**

*Московский политехнический университет, Москва*

bondar@mami.ru

Рассматривается математическое моделирование процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений материалов при повторных и длительных воздействия термомеханических нагрузок. Анализируются некоторые особенности прогнозирования ресурса материалов и конструкций при повторных и длительных режимах термомеханических нагружений. Результаты расчетов сопоставляются с результатами экспериментальных исследований, а также с результатами расчетов на основе методов и критериев, применяемых в расчетной практике.

### РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ВЗРЫВЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН СО СТЕНКАМИ

**В.С.Бондарь[1], Э.Е.Сон[2], Ю.М.Темис[3]**

[1]*Московский политехнический университет, Москва*

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

[2]*Центральный институт авиационного моторостроения им. Баранова, Москва*

son.eduard@gmail.com

Представлена методика численного моделирования решения методом крупных частиц трехмерных уравнений Навье-Стокса применительно к реальным высоковольтным маслонаполненным трансформаторам для обеспечения взрывобезопасности, она представляет собой эффективный программный комплекс, включает широкий спектр математических моделей, позволяющий моделировать сложные нестационарные трехмерные процессы и течения химически реагирующих смесей вязких газов включая двухфазные течения с химическими реакциями, горение и детонацию конденсированных взрывчатых веществ и топливно-воздушных смесей. Используется метод крупных частиц, позволяющий получать решения для потоков с числами Маха от 0,8 до 7.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СО СКАЧКОМ УПЛОТНЕНИЯ НА НАГРЕТОЙ РАМПЕ

**А.В. Глушнева [1,2], А.С. Савельев [1,2], Э.Е. Сон [1,2]**

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

[2]*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*

glushniova.alexandra@gmail.com

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию неустойчивости отрывного течения, появляющегося в результате взаимодействия турбулентного пограничного слоя со скачком уплотнения. В ходе работы было изучено влияния тепловыделения на поверхности на течение в области отрыва. Эксперименты проводились в сверхзвуковом потоке M=2 на угле сжатия. Визуализация течения проводилась методом Particle Image Velocimetry. Были получены поля векторов скоростей и вычислены среднеквадратичные отклонения полей векторов скорости. Анализ данных показал, что нагрев поверхности увеличивает амплитуду колебаний границ области отрыва, что может быть объяснено увеличением области отрыва при нагреве.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВНОЙ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

**В.А. Грибков, А.Э. Жашуев, И.Н. Полубарьев**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва*

zenit-ab@mail.ru

Определены собственные частоты и формы неосесимметричных колебаний составной упругой оболочки вращения, частично заполненной жидкостью. Незакрепленная оболочка состоит из двух связанных соосных элементов с осью симметрии, занимающей вертикальное положение. Уровень заполнения оболочки жидкостью – произвольный. Получены частотно-волновые характеристики системы – зависимости собственных частот колебаний от окружной формы колебаний оболочки. Расчет частотно-волновых характеристик выполнен методом конечных элементов. Расчетные результаты подтверждены экспериментальными данными, полученными при модальных испытаниях материальной модели составной оболочки методом ударного нагружения.

## ГИДРОДИНАМИКА АВТОКОЛЕБАНИЙ С СОУДАРЕНИЯМИ ТЕЛ В КАНАЛАХ

**С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова, Я.А. Дынников, П.Р. Андронов, А.Ф. Зубков**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИ механики, Москва*

dyn@imec.msu.ru

Представлены результаты исследования автоколебаний в каналах при наличии загромождающих проточное сечение подвижных твердых тел. Колебания сопровождаются соударениями тел со стенками канала. Это определяет сложность задачи, которая должна решаться в сопряженной постановке для уравнений динамики и гидродинамики в условиях, когда область течения меняет форму и даже тип связности в моменты соударений, для которых необходимы дополнительные соотношения перехода. В настоящей работе эти трудности преодолены на примерах решения задач об автоколебаниях обратного флюгера в диффузоре и цилиндрической шайбы в плоско-параллельном канале.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-00133.

## ПРОБЛЕМЫ И НАЗЕМНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ В КАПЕЛЬНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

**В.А. Жбанов[1], А.Б. Миллер [1,2], Ю.Ф. Потапов [1], О.Д. Токарев [1]**

[1] *Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский*

[2] *Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*

zhbanov@physics.msu.ru

Проведена модификация существующих стендов искусственного обледенения ЦАГИ для соответствия новым требованиям авиационных правил, включающих кристаллическое и смешанное обледенение. Разработаны методики и проведены экспериментальные исследования элементов конструкции и датчиков летательного аппарата.

Работа выполнена в рамках проекта MUSIC-haic программы HORIZON 2020 ЕС при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI62818X0010..

## МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОСЕРВОУПРУГОСТИ САМОЛЕТА В ТРАНСЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

**М.Ч. Зиченков, Ф.З. Ишмуратов, С.И. Кузьмина**

*Центральный Аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), г. Жуковский*

fanil.ishmuratov@tsagi.ru

Приведено описание разработанной методологии решения задач аэросервоупругости самолета в трансзвуковом потоке. Применение методологии продемонстрировано при синтезе и анализе системы активного подавления флаттера (СПФ) для среднемагистрального самолета с крейсерским режимом полета при числе Маха M=0.82. Показано, что предложенные структура и параметры СПФ позволяют компенсировать падение скорости двух форм флаттера, обусловленное трансзвуковыми явлениями.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НАКЛОНЕННЫМИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫМИ ЛУНКАМИ

**С.А. Исаев [1], А.Г. Судаков [1], М.Е. Гульцова [1], Д.В. Никущенко [2], А.Г. Егорова [2], А.Е. Усачов [3]**

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург*
[3]*Московский комплекс ЦАГИ, Москва*

isaev3612@yandex.ru

Методами численного моделирования открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения в уединенной и однорядной наклоненной овально-траншейной лунке в узком канале. Абсолютная величина трения в зоне возвратного течения растет многократно (до 5.5 раз) по сравнению с трением в гладком канале. В облуненном канале поток ускоряется в 1.4-1.5 раза. Проанализировано влияние уплотнения лунками нагретой стенки канала.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00148.

## КАВИТАЦИЯ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ЭКСЦЕНТРИЧНЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

**В.Д. Котелкин [1], А.А. Монахов [2]**

[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, механико математический факультет, Москва*
[2]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

kotelkin@mech.math.msu.su

Представлены результаты численного и экспериментального исследования течения с кавитацией в зазоре между эксцентричными цилиндрами. Движение жидкости задается вращением внешнего цилиндра. Показано, что с увеличением радиуса внутреннего цилиндра происходит увеличение длины кавитационного пузырька. Дано объяснение возникновения кавитации в виде дискретных пузырьков. Высказана причина образования заостренной формы носовой части пузырька.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОЙ КОНСТРУКЦИИ С ТРАНСЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

**С.И. Кузьмина, Ф.З. Ишмуратов, О.В. Карась**

*Центральный Аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), г. Жуковский*

kuzmina@tsagi.ru

Приведено описание основных особенностей разработанной математической модели взаимодействия упругой конструкции с трансзвуковым вязким потоком. Новый подход базируется на интеграции метода расчета нестационарного трансзвукового обтекания и полиномиального метода Ритца для решения задач аэроупругости. Результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными для известных тестовых конфигураций: крылья LANN, BACT, AGARD 445.6 и модель NASA CRM. Выполненные исследования на примере современного среднемагистрального самолета показали, что вязкость потока может оказывать заметное влияние на характеристики аэроупругости.

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ СИЛЫ, СОЗДАВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

**А.П. Курячий, С.В. Мануйлович, Д.А. Русьянов, С.Л. Чернышев**

*Центральный аэрогидродинамический институт, г. Жуковский*

aleksandr.kuryachiy@tsagi.ru

Предложены аналитические выражения для пространственных распределений компонент средней по времени объемной силы, создаваемой аэродинамическим исполнительным элементом на основе приповерхностного барьерного разряда. Используется приближение бездивергентного поля объемной силы. Рассчитанное поле скорости в приповерхностной струе, индуцируемой исполнительным элементом, качественно и количественно согласуется с опубликованными экспериментальными данными. Объяснены основные особенности распределений горизонтальной и вертикальной компонент объемной силы, наблюдаемые в экспериментах.

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

**Е.В. Кустова, М.А. Мехоношина, А.А. Косарева**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

e.kustova@spbu.ru

Методами кинетической теории исследуются релаксационные процессы в потоках углекислого газа с учетом различных механизмов колебательной релаксации. Разработаны модели разной степени детализации. Предложен алгоритм расчета времени колебательной релаксации в многоатомных молекулах. Показано, что разделение вращательных и колебательных мод приводит к существенно завышенным значениям коэффициента объемной вязкости. Исследована структура ударной волны в $CO_2$. Показано, что обоснованный выбор модели значительно расширяет область применимости континуального подхода для моделирования неравновесных течений.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00707 и 18-31-00110.

## РЕЗОНАНСЫ В КАНАЛЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ СТЕНКАМИ

**О.А. Логвинов [1], А.А. Малашин [1,2]**

[1]*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва*

[2]*Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, г. Мытищи*

oleglogvinov@mail.ru

Рассматривается течение вязкой сжимаемой жидкости в плоском канале с осциллирующими стенками. На основе решений линеаризованных уравнений Навье – Стокса получено условие возникновения резонанса – соотношение между частотой вибрации стенок, геометрическими характеристиками канала (длиной, шириной) и скоростью звука в жидкости. Резонанс приводит к периодическим изменениям параметров течения с максимальной амплитудой. Более того, численное решение полной нелинейной системы Навье – Стокса показывает, что, даже если жидкость поступает в канал при постоянном градиенте давлений, возможно многократное увеличение массового расхода течения (кумулятивный резонанс).

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ И РАЗВИТИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В НАЛЕДИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Г.В. Моллесон [1], А.Л. Стасенко [1,2]**

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский*

[2]*Московский физико-технический институт (гос. университет), г. Долгопрудный*

molleson@yandex.ru

Моделируется взаимодействие дисперсного дозвукового потока воздуха, содержащего капельки воды, со сферой. Разработана физико-математическая модель и соответствующий численный алгоритм для оценки компонент локальных напряжений, возникающих из-за больших градиентов температуры, вызванных интенсивным выделением теплоты кристаллизации капель на поверхности слоя льда в переохлажденном воздушно-капельном потоке. Исследовано нарастание наледи на обтекаемом теле, изменения температуры и компонент термических напряжений в объеме наледи.

Работа выполнена в рамках проекта MUSIC-haic программы Horizon 2020 EC.

## МНОГОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЙ СМЕСЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ МОЛЕКУЛЫ CO2, И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

**Е. А. Нагнибеда, А. А. Косарева**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

e_nagnibeda@mail.ru

В работе изучена химическая и колебательная кинетика в смесях $CO_2/CO/O_2/C/O$, $CO_2/CO/O$ и ее влияние на параметры течений в релаксационной зоне за ударными волнами. На основе многотемпературных распределений, полученных в кинетической теории газов, исследованы течения ударно нагретых смесей в разных приближениях. Показано сравнение параметров течений, найденных в пятитемпературном, трехтемпературном, двухтемпературном приближениях и в однотемпературном газе. Обсуждается влияние моделей неравновесной кинетики на параметры потоков и скорость диссоциации за ударными волнами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00493.

## О ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЯХ ТОНКИХ БАЛОК В ЖИДКОСТИ

**А.Н. Нуриев [1,2], А.М. Камалутдинов [2], О.Н. Зайцева [3]**

[1]*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

[2]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань*

[3]*Казанский национально исследовательский технологический университет, г. Казань*

nuriev_an@mail.ru

В работе проводятся исследования взаимодействия жидкости с тонкими консольно-закрепленными балками, совершающими изгибные колебания. Исследование основано на экспериментальных измерениях гидродинамических сил, а также численном моделировании взаимодействия балок с вязкой несжимаемой жидкостью. По результатам работы представлена модель гидродинамического воздействия на балку, которая с хорошей точностью описывает гидродинамическое демпфирование колебаний, изменение резонансной частоты, а также эффект параметрического резонанса, приводящего к появлению вторичных крутильных колебаний. Численное исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 15-19-10039.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ СУЖАЮЩЕЙСЯ ИЛИ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ТРУБКИ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ВНУТРИ ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

**А.Б. Порошина**

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

poroshina@imec.msu.ru

Анализ устойчивости трубки бесконечной длины показывает, что возможна осесимметричная неустойчивость упругой трубки с протекающей внутри псевдопластической жидкостью ( $n < 0.611$ ), которая не возникает при течении ньютоновской жидкости.

Данная работа посвящена исследованию флаттера упругих сужающихся или расширяющихся трубок конечной длины с протекающей внутри псевдопластической жидкостью. Получено, что неустойчивость возникает для упругих трубок конечной длины с сужением или расширением, и полученная область неустойчивости больше области абсолютной неустойчивости для трубок бесконечной длины.
Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-29-10020 и № 18-31-00407.

## SPH-РЕАЛИЗАЦИЯ ГИПОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

**И.И. Потапов, О.В. Решетникова**
*Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск*
Potapov2i@gmail.com

В работе рассмотрен один из вариантов SPH-реализации гипопластической модели движения сыпучей среды. Исследуются описательные возможности модели, рассмотрены вопросы калибровки ее параметров применительно к задаче обрушения колонн грунта. Выполнены сравнения полученных численных результатов моделирования с экспериментальными данными.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00530 А.

## САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИЕСЯ ВОЛНЫ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СРЕДАХ И ИХ АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

**Н.Н. Смирнов [1,2]**
[1]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва*
[2]*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, Москва*
ebifsun1@mech.math.msu.su

Дается обзор нестационарных переходных режимов распространения самоподдерживающихся экзотермических волн в метастабильных средах различных типов. А именно, рассматривается переход от одного самоподдерживающегося режима к другому. К таким процессам относится переход волн дефлаграции в волны детонации в гомогенных и гетерогенных горючих смесях. Обсуждаются плюсы и минусы применения различных режимов горения для аэрокосмических приложений, а именно: пульсирующие детонационные двигатели и двигатели с вращающейся детонационной волной. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00607.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ СО СТРУКТУРАМИ

**К.Э. Сон[1,2], Э.Е. Сон[1,2]**
[1]*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*
[2]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*
son.eduard@gmail.com

Рассмотрены задачи взаимодействия гидро-газодинамических течений со структурами в потоке. Получены уравнения для многофазных сред с границами фазовых переходов, когда скачки плотности на границе в уравнениях непрерывности, движения и энергии приводят к уравнениям гидродинамики в обобщенных функциях. Преимуществом полученных уравнений является возможность осреднения уравнений для турбулентных течений в многофазной гидродинамике при наличии двух групп масштабов – размеров фазовых областей и турбулентных масштабов в каждой фазе. Приведены примеры решений осредненных уравнений (RANS, LES) для многофазных турбулентных течений.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-49-02031.

## ДИСКРЕТНО-КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРА В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

**А.Л. Стасенко [1,2], А.В. Кашеваров [1]**
[1]*Центральный аэрогидродинамический институт, г. Жуковский*
[2]*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*
stasenko@serpantin.ru

Предложена новая физико-математическая модель стохастического роста наледи на поверхности твердого тела в воздушно-капельном переохлажденном потоке. Приведены результаты численного исследования обледенения поперечно обтекаемого цилиндра, полученные при использовании разработанной модели.
Работа выполнена в рамках проекта MUSIC-haic программы HORIZON 2020 ЕС при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI62818X0010.

## ПОВЕДЕНИЕ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**И.В. Стурова, Л.А. Ткачева**
*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск*
sturova@hydro.nsc.ru, tkacheva@hydro.nsc.ru

Решена линейная задача о волнах в жидкости и ледяном покрове при равномерном движении области давления по свободной поверхности жидкости вдоль кромки полубесконечного ледяного покрова (случай 1) или в разводье между двумя ледовыми пласти-

нами (случай 2). Ледяной покров моделируется тонкой вязко-упругой пластиной постоянной толщины, плавающей на поверхности идеальной несжимаемой жидкости конечной глубины. В подвижной системе координат прогиб пластины и возвышение жидкости предполагаются установившимися. Получено аналитическое решение и исследованы волновые силы, возвышение свободной поверхности, прогиб и деформации ледяного покрова при различных скоростях движения нагрузки.

## МНОГОДИСЦИПЛИНАРНЫЕ МОДЕЛИ «ВИРТУАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ»

**Ю.М. Темис[1,2]**

[1]*Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П. И. Баранова, Москва*

[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

tejoum@ciam.ru

Процесс проектирования конструкции авиационного двигателя требует применения современных методов и алгоритмов многодисциплинарного математического моделирования газовой динамики, теплопроводности и механики деформируемого твердого тела, объединенных в единую стратегию «Виртуального двигателя». Актуальность такого подхода основана на необходимости сокращения объемов дорогостоящих натурных испытаний деталей, узлов и конструкций. Кроме этого, технология многодисциплинарного моделирования позволяет, при наличии моделей различного уровня, обеспечить как распознавание и восполнение объемов информации, получаемой в натурных экспериментах, так и проведение вычислительных экспериментов, позволяющих исследовать поведение конструкций в экстремальных условиях. В докладе обсуждаются принципы создания многодисциплинарных моделей и представлены примеры применения стратегии виртуального двигателя на различных стадиях проектирования деталей и узлов двигателей.

## ТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ РЕШЕТКУ ГИБГИХ ПРОФИЛЕЙ

**А.Г. Терентьев, Н.А. Федоров**

*ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары*

*agterent@rambler.ru*

Предлагается численный алгоритм расчета течения сквозь решетки произвольных профилей, как с фиксированной конфигурацией, так и деформируемых дуг. Исследуется решетка гибких дуг применительно к винтовым турбинам. Алгоритм расчета составлен на основе интегральных уравнений Грина для решетки. Рассмотрены также упрощенные математические модели в линеаризованной постановке. Численные результаты сравниваются с аналитическими и экспериментальными данными. Представлены также некоторые новые результаты в нелинейной теории решеток пластин. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета Министров Чувашской Республики в рамках научного проекта № 17-48-210286.

## ОБ УПРАВЛЕНИИ ТРЕХМЕРНЫМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

**В.Ю. Хомич [1], С.Л. Чернышев [2]**

[1]*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт, г. Жуковский*

slc@tsagi.ru

Представлена новая многоразрядная актуаторная система, функционирующая на основе приповерхностного барьерного разряда и позволяющая создавать непрерывный однонаправленный воздушный поток над протяженными участками поверхности. Представлены результаты экспериментов в дозвуковой аэродинамической трубе, подтверждающие возможность существенного уменьшения скорости поперечного течения и интенсивности стационарных вихрей неустойчивости в результате объемного силового воздействия на трехмерный пограничный слой, создаваемого с помощью разработанной актуаторной системы.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННОГО ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

**М.М. Шакирьянов [1], А.В. Ахмедьянов [1, 2]**

[1]*ИМех УФИЦ РАН, г. Уфа*

[2]*Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа*

shakmar9@mail.ru

Исследованы нелинейные колебания двух опорного трубопровода и заключенной в нем жидкости при действии переменного внутреннего давления. Приняты в расчет поступательные движения основания, к которому прикреплены опоры, а также взаимодействия внутреннего давления и изменения кривизны осевой линии, продольной и окружной деформаций трубы. Числовые расчеты проведены для стальной трубы. Дан анализ результатов вычислений.

Постановка задачи и анализ результатов вычислений выполнены при поддержке грантов РФФИ (№ 17-41-020400_р_а и № 18-01-00150). Компьютерный код разработан в рамках государственного задания на 2019-2022 годы (№ 0246-2019-0088).

## Симпозиум «МЕХАНИКА ПРОЦЕССОВ НЕФТЕДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ»

### ГАШЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ

**Г.Р. Аветисян,А.А. Симонян, А.С. Гаспарян**

*Отдел гидромеханики и вибротехники НАН РА, Гюмри (Армения)*

energopower@mail.ru

В работе рассмотрены вопросы возникновения переходных процессов (гидроударов) в магистральных нефтепроводах и характеристики ударного давления. Для гашения гидроударов в магистральных нефтепроводах предлагается применять высокоэффективные устройства - стабилизаторы волновых процессов, конструкции которых отличаются технологичностью изготовления, экономичностью эксплуатации и долговечностью. При правильном подборе упругих элементов и конструктивных параметров стабилизаторов можно достичь гашения уровня гидроудара на 90%.

### ТРЕЩИНА АВТО-ГРП КАК МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ФЛЮИДОУПОР

**А.А. Аксаков[1], В.А. Байков[1,2], О.С. Борщук[1], С.И. Коновалова[1,3]**

*[1]ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа*

*[2]Уфимский государственный авиационный технический университет*

*[3]Башкирский государственный университет, Уфа*

baikov@ufanipi.ru

Рассмотрена модель миграции жидкости через флюидоупор по трещинам авто-ГРП. Представлена замкнутая система интегро-дифференциальных уравнений, описывающая рост трещины и течение в ней флюида, включающая уравнения равновесия линейно-упругой среды и динамики несжимаемой жидкости в приближении смазочного слоя в поле силы тяжести. Для квазистационарного режима получены аналитические решения, связывающие ширину раскрытия и полудлину трещины с расходом жидкости и избыточным давлением, согласующиеся с расчетами. Рассмотренный механизм фильтрации жидкости через флюидоупор по трещинам авто-ГРП, по мнению авторов, может являться одним из основных при формировании нефтяных и газовых залежей.

### ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ ПОРОУПРУГОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

**А.Н. Байкин[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

alexey.baykin@gmail.com

В работе обсуждается вопрос о влиянии пороупругих эффектов на развитие радиальной трещины гидроразрыва пласта (ГРП).Для этогосформулирована математическая модель данного процесса, основанная на уравнениях Био. Разработан алгоритм численного решения задачи на основе метода конечных элементов. Предложены безразмерные параметры, отвечающие за эффект пороупругости. В результате численных экспериментов делается вывод, при каких условиях пороупругость может оказывать существенное влияние на развитие трещины ГРП.

Работа выполняется при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027).

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В ХОДЕ СТИМУЛЯЦИИ И В ПЕРИОД ОСВОЕНИЯ СКВАЖИНЫ

**Г.Т. Булгакова**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

bulgakova.guzel@mail.ru

Разработан инструмент для повышения эффективности дизайна гидроразрыва пласта на основе математического моделирования температурных полей в трещине ГРП при её развитии и опробовании. Математическая модель, описывающая динамику температуры в трещине ГРП с учетом утечки жидкости в пласт, представляет эволюционное уравнение конвективного теплопереноса с источником, который определяется как плотность теплового потока из пласта. Для проверки адекватности модели динамики температуры в трещине ГРП, представлена модель восстановления температуры в трещине с последующей адаптацией результатов моделирования на фактических данных.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-020226 р_а.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛОСКОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В РАМКАХ ПОДХОДА PLANAR3D ILSA

**А.В. Валов[1], А.Н. Байкин[1,2], Е.В. Донцов[3]**

[1]*Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*W.D. Von Gonten Laboratories, Houston, USA*

a.valov1705@gmail.com

В работе разработан алгоритм определения геометрии плоской трещины гидроразрыва в рамках подхода Planar 3D ILSA. Для определения положения движущегося фронта трещины используется универсальное асимптотическое решение в вершине трещины. Алгоритм позволяет учитывать влияние контраста напряжений по слоям, наличие перемычек с повышенным напряжением, влияние утечек, переменный расход жидкости. Кроме того, был реализован алгоритм решения контактной задачи при частичном или полном закрытии трещины.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027).

## СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА В ПОРОУПРУГОЙ СРЕДЕ

**С.В. Головин[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

golovin@hydro.nsc.ru

В докладе излагаются недавние достижения в области моделирования трещины гидроразрыва пласта в пороупргой среде, полученные в ИГиЛ СО РАН. Обсуждаются достоинства и недостатки различных подходов к моделированию, а также описываются области применения каждого типа моделей. Описываются задачи многоцелевой оптимизации дизайна скважины с МГРП, задача о сопряженном течении пропанта и раскрытия трещины, задачи определения области существенного влияния пороупругих эффектов.

Работа выполняется при поддержке Минобрнауки России (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ТЕСТА В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПЛАСТАХ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ВЫШЕ МИНИМАЛЬНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**А.Я. Давлетбаев[1], З.С. Мухаметова[2]**

[1]*Башкирский государственный университет, Уфа*

[2]*Уфимский государственный технический нефтяной университет, Уфа*

DavletbaevAY@rambler.ru

В работе обсуждаются результаты численного моделирования закачки жидкости в скважину с давлением, превышающим минимальное горизонтальное напряжение. Развитие трещины в низкопроницаемом пласте происходит по модели Перкинса-Керна-Нордгрена. Утечки жидкости через поверхность трещины с пластом осуществляются по закону Дарси, учитывается взаимовлияние утечек жидкости вдоль трещины по соседним ячейкам численной модели.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С ОСЛОЖНЕННЫМИ УСЛОВИЯМИ РАЗРАБОТКИ

**Н.Н.Диева[1], М.Н. Кравченко[1], А.Н.Лищук[2]**

[1]*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва,*

[2]*ООО «УК Группа ГМС», Москва,*

ninadieva@bk.ru

В настоящей работе речь пойдет о перспективной технологии термохимической обработки, использующей энергию экзотермической реакции взаимодействия двух неорганических солей, закачиваемых в пласт в виде водного раствора. Технология является экологически безопасной и эффективной для интенсификации добычи на низкодебитных скважинах «старых» пластов и для низкопроницаемых пластов нетрадиционной высоковязкой нефти. Авторы создали математическую модель процесса и провели ряд численных исследований, положенных в основу промысловых экспериментов по опробованию технологии на различных месторождениях России.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-07-00433 А.

## РЕОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОННАЯ МОДЕЛЬ АНОМАЛИИ ВЯЗКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ГЕЛЕЙ

**М.Ю Доломатов[2,3]., А.Г. Телин[1]**

*[1]ООО Уфимский НТЦ, Уфа*

*[2] ФГБОУ ВОБашкирский государственный университет, Уфа*

*[3]ФГБОУ ВО «Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет»*

mdolomatov@bk.ru

Химически активные, гелеобразующие полимерные среды широко используются при разработке месторождений, повышения нефтеотдачи пластов и химической промышленности. В таких средах наблюдаются эффекты сверханомалий вязкости, которые выражаются в экстремумах кривых напряжение сдвига- скорость сдвига в коллоидных системах технического и природного происхождения, а также сшитых гелеобразующих полимерных составах. Описаны существующие в настоящее время реологические модели сверханомалий вязкости, показаны их недостатки. Предложена структуронная модель температурно-временной реодинамики термообратимого полимерного геля, которая в отличие от известных моделей Де Вилла-Оствальда, Бингама и перколяционно-фрактальных моделей объясняет аномалию вязкости в тиксотропных системах возмущением энергии межмолекулярного взаимодействия частиц (структуронов) в поле внешних сил.

## ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕИЯ НА ДИНАМИКУ ПОТОКОВ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБАХ

**Ю.А. Дроздова[1], М.Э. Эглит [2], А.Е. Якубенко[3]**

*[1]РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва*

*[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

*[3]Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

drozdova.y@gubkin.ru

Рассматриваются нестационарные потоки в трубах, в которых градиент давления включает в себя как постоянную, так и осциллирующую составляющую. На основе математической модели движения по трубам жидкостей с различной реологией проведена оценка эффективности использования пульсирующего режима перекачки. Проведены численные расчеты для течения ньютоновского и степенного флюидов

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-0115.

## О РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО АНАЛОГА ЭФФЕКТА ТОМСА

**В.В. Жолобов**

*ООО «НИИ Транснефть», Москва*

ZholobovVV@niitnn.transneft.ru

В докладераскрывается проблема рационального использования эффекта снижения гидравлического сопротивления и теплоотдачи в результате применения малых высокомолекулярных полимерных добавок. Применительно к «горячей» перекачке дана постановка новых краевых задач, позволяющих проводить оценку в сопоставлении с перекачкой без применения присадки. Приведены результаты приложения к задаче повышения эффективности работы тепловых станций или пунктов подогрева.

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЛУЧАЕВ НАРУШЕНИЯ И ВОЗВРАЩЕНИЯ В ПРОЕКТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

**Р.М. Зарипов, Р.Н. Бахтизин**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

Rail.Zaripov@gmail.com

Представлен краткий анализ публикаций, посвященных исследованиям напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости трубопроводов, которые эксплуатируются в сложных инженерно-геологических условиях. В предлагаемой постановке задачи о НДС трубопровода, методе ее решения указаны их преимущества по сравнению с результатами исследований других авторов, приведены результаты расчета основных характеристик прочности и устойчивости трубопровода для различных случаев нарушения и вариантов возвращения его в проектное положение.

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ВОДОНЕФТЯНЫЕ ЭМУЛЬСИИ

**Р.Р. Зиннатуллин, Р.Ф. Султангужин, А.Ф. Габдрафиков, Э.Ф. Гайнетдинов**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

rasulz@yandex.ru

Исследуются особенности воздействия высокочастотного и сверхвысокочастотного электромагнитных полей на водонефтяные эмульсии с различными физико-химическими свойствами, их нагрева и расслоения. Описаны лабораторные стенды и методы экспериментальных исследований. Приведены результаты экспериментальных исследований нагрева эмульсий в высокочастотных и

сверхвысокочастотных электромагнитных полях при динамических условиях и результаты их расслоения при этом. Показана корреляция степени воздействия высокочастотного электромагнитного поля от диэлектрических свойств эмульсии и сверхвысокочастотного электромагнитного поля от содержания воды.

## ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ТЕЧЕНИЮ ПОЛИМЕРОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

**В.В. Кадет, М.Н. Кравченко, А.В. Евтюхин, В.В. Ярыш**

*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва*

kadet.v@gubkin.ru

В работе представлена обобщенная перколяционно-гидродинамическая модель, включающая как описание гидродинамики многофазных многокомпонентных течений флюидов в пористой среде, так и их взаимодействие с поверхностью порового пространства. Модель содержит дифференциальные уравнения сохранения массы, обобщенные уравнения фильтрации Дарси, систему полуэмпирических соотношений для определения скорости сорбции/десорбции частиц взвеси, изменения вязкости вытесняющего агента от концентрации примеси. Важным элементом модели является перколяционная модель расчета фильтрационно-емкостных характеристик пористой матрицы (пористости и проницаемости).

## ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩАХ ГАЗА

**В.И. Карев**

*Институт проблем механики РАН, Москва*

wikarev@ipmnet.ru

В работе представлен комплексный подход к моделированию геомеханических процессов в пластах-коллекторах подземных хранилищ газа. Он учитывает их особенности, связанные с анизотропией упругопластических, прочностных и фильтрационных свойств пород-коллекторов ПХГ, с влиянием больших массовых сил, возникающих при фильтрации в высокопроницаемых пластах ПХГ, с влиянием цикличности нагружения пласта, обусловленной попеременными режимами закачки и отбора газа.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310371-9).

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЫСОКОПАРАФИНИСТЫХ НЕФТЕЙ ПО МОРСКИМ НЕФТЕПРОВОДАМ

**З.Ф. Каримов, М.Ф. Каримов**

*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва*

karimov.m@gubkin.ru

В работе представлена математическая модель работы действующего нефтепровода, по которому производится перекачка высокозастывающих и высокопарафинистых нефтей. На базе этой модели составлена компьютерная программа, позволяющая в широком диапазоне изменения технологических параметров, характеризующих работу трубопровода, численно моделировать происходящие в потоке нефти гидродинамические и тепломассобменные процессы, что в реальном масштабе времени создает техническую возможность воздействовать на процесс перекачки, следовательно, управлять этими процессами.

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МАЛОПРОНИЦАЕМЫХ ЭКРАНОВ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ХРАНЕНИИ ГАЗА В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

**М.Ф. Каримов, Л.М. Муллагалиева, С.А. Хан**

*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва*

karimov.m@gubkin.ru

В докладе изложены результаты гидромеханических исследований и опыт реализации впервые в мировой практике создания протяженных криволинейных внутрипластовых малопроницаемых экранов из дисперсных систем для ограничения движения газового объема при закачке газа и вторжения пластовой воды в газовую залежь при отборе газа из хранилища. Аналогичная задача имеет место также при эксплуатации газовых месторождений, приуроченных к пластовым водонапорным системам.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБАБОТКА НЕФТИ КАК СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Г.И. Каримова, Л.А. Ковалева**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

gulshat-karimova-1993@mail.ru

Проведено экспериментально - аналитическое исследование влияния высокочастотной электромагнитной обработки на реологические свойства нефтей с различных месторождений. Методом моделирования работы системы трубопровод – перекачивающая станция выполнена оценка влияния электромагнитной обработки на гидромеханику процесса транспортировки нефти, и как следствие, производительность магистральных трубопроводов. В результате работы выявлено уменьшение вязкости перекачиваемого продукта после обработки, уменьшение гидравлического сопротивления трубопроводов и увеличение производительности их работы.

## К ОЦЕНКЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРОПАНТА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОПЕРАЦИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА

**Д.В. Кашапов[1], Ф.А. Ташбулатов[2], К.А. Тимасов[2]**

[1]*Институт механики им. Р.Р.Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

[2]*ООО «Градиент», Уфа*

deniskashapov14@gmail.com

В работе рассмотрены вопросы о поведении пропанта в горизонтальной секции скважины при проведении операции гидравлического разрыва пласта (ГРП). Рассмотрены вопросы движения и оседания пропанта с жидкостью ГРП при различных режимах работы: расхода используемой жидкости, концентрации пропанта в жидкости ГРП, а также различных типов пропанта (плотности и диаметра). По результату расчета вычислены необходимые параметры обработки для предотвращения оседания пропанта в скважине с учетом технологических параметров обработки, а также линейных размеров горизонтального участка скважины (длины и внутреннего диаметра). Вычислительное моделирование проводилось с применением программного комплекса с открытым кодом OpenFOAM.

## СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДОБЫЧЕ, ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕЙ

**Л.А. Ковалева**

*Башкирский государственный университет, Уфа*

Liana-kovaleva@yandex.ru

В докладе рассматриваются современные теоретические подходы, результаты математического и экспериментального моделирования, а также практические приложения взаимодействия электромагнитных полей преимущественно ВЧ и СВЧ диапазонов с нефтяными дисперсными системами. Интерес к этим исследованиям в последние годы связан со все возрастающим пониманием эффективности применения методов ЭМ воздействия для повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов, их подготовки и транспортировки по трубопроводам в связи с высокой вязкостью, сложной реологией, образованием устойчивых водонефтяных эмульсий и экологических проблем. Отражены результаты работ коллектива под руководством автора, выполненных по грантам РФФИ, Минобрнауки, Сколковского института науки и технологий.

## ГИДРОДИНАМИКА СМЕСИ ЖИДКОСТИ И ПРОПАНТА В ТРЕЩИНЕ ГРП

**П.В. Ковтуненко**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

pkovtunenko@gmail.com

Рассматривается задача о моделировании течения смеси жидкостей и пропантов внутри трещины ГРП. Математическая модель включает в себя уравнение эллиптического типа для нахождения распределения давления внутри трещины и уравнения переноса для концентраций. Проводится ряд численных экспериментов, целью которых является изучение влияния параметров течения на возникновение зон локальной закупорки трещины, на образование и распространение вязких пальцев.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕПЛОВОЙ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ ГОРЯЧИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ЧЕРЕЗ ПОЛЫЕ ШТАНГИ

**Н.А. Костарев, Н.М. Труфанова**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

nikostarev@gmail.com

В работе рассмотрены вопросы расчета теплового состояния скважины, оборудованной штанговым глубинным насосом при проведении тепловой обработки через полые штанги с перепускной муфтой. Получены решения уравнений нестационарного турбулентного тепломассопереноса в нефтяной скважине при промывке горячей нефтью и водой. Задача решалась численно методом конечных объемов в программном модуле ANSYS Fluent. Получены поля температур и скоростей, распределение температуры в скважине по глубине при различных режимах подачи теплоносителя. Приведено сравнение распределения температуры внутри скважины при промывке нефтью и водой.

## СВЯЗАННОЕ ТЕРМО-ГИДРО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПАРОТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТ

**А.А. Костина[1], М.С. Желнин[1], О.А. Плехов[1], Ю.А. Клюкин[2]**

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Горный институт УрО РАН, Пермь*

kostina@icmm.ru

Работа направлена на создание трехмерной математической модели паротеплового воздействия на продуктивный пласт и алгоритма ее компьютерной реализации. Модель описывает процессы фильтрации трехфазного флюида, конвективный теплоперенос, фазовый переход, влияние порового давления на напряженно-деформированное состояние пласта и эволюцию пористости, а также

позволяет учитывать данные о расположении и количестве скважин. Результаты верификации показывают хорошее согласование с натурными данными термометрии Ярегского месторождения.
Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-4174.2018.1).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМО-ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КЕРОГЕНОСОДЕРЖАЩИЕ ПЛАСТЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ

**М.Н. Кравченко[1], Н.Н.Диева[1], А.В. Мурадов[1]**
[1]*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва*
kravchenko.m@gubkin.ru

Авторами построена гидродинамическая модель, позволяющая рассчитывать различные типы термохимического воздействия на пласты сложного строения (типа баженовской свиты) с учетом физико-химических реакций, процессов сорбции и десорбции, тепловой деструкции, изменения пористости и проницаемости, генерации подвижных углеводородов из керогена и изменения фильтрационных характеристик. Сравнение численных расчетов с экспериментом на керне показало адекватность принятого подхода к моделированию физико-химических процессов в пористых средах с изменяющейся структурой.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № №19-07-00433 А.

## К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ТРУБОПРОВОДА В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ

**И.Н. Криони[1], В.Н. Киреев[2], З.З. Шарафутдинов[3]**
[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*
[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*
[3]*ООО НИИ Транснефть, Москва*
yogrek2@gmail.com

Рассматривается процесс протаскивания трубопровода через канал. При моделировании данного процесса учитываются взаимодействия между трубопроводом, колонной бурильных труб, почвой и буровым раствором. Протаскиванию трубопровода через скважину препятствуют силы трения трубопровода и колонны бурильных труб о почву, а также сила сопротивления трубопровода при его движении в буровой жидкости. При построении математической модели учтено влияние этих сил. Для определения сил трения трубопровод и колонна бурильных труб рассматривались как гибкая нерастяжимая нить. Создан и реализован алгоритм определения тягового усилия. Отдельный этап работы посвящен учету балластировки трубопровода.

## О НЕОБХОДИМОСТИ АДАПТИВНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В РАСЧЕТАХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**С.Е. Кутуков, А.И. Гольянов, О.В. Четверткова**
*Научно-технический центр ООО «НИИ Транснефть», Уфа*
KutukovSE@niitnn.transneft.ru

В докладераскрывается проблема неудовлетворительной сходимости результатов гидравлических расчетов с данными эксплуатации магистральных нефте и нефтепродуктопроводов, уложенных в рельеф местности. Дана оценка фактических коэффициентов гидравлического сопротивления ряда технологических участков нефтепроводов по данным их эксплуатации в сопоставлении с формулой Блазиуса. Приведены результаты приложения адаптационного подхода к задаче определения параметров гидравлического сопротивления технологических участков магистральных нефтепроводов в фактических режимах их эксплуатации. Работа выполнена в рамках бенчмаркинговых исследований энергоэффективности членов Международной ассоциации транспортировщиков нефти.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»

**Н.Н. Лысиков, Д.Ю. Погорелов**
[1]*ООО «Вычислительная механика», Брянск*
[2]*Брянский государственный технический университет, Брянск*
lysikov@umlab.ru

Рассматриваются подходы и методы создания динамических моделей бурильной колонны в скважине, реализованные в программном комплексе «Универсальный механизм», а также их применение для решения прикладных и исследовательских задач, возникающих на различных этапах проектирования и строительства скважин для добычи нефти и газа.
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00815.

## МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В СКВАЖИНЕ ПРИ БУРЕНИИ МЕТОДОМ УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ

**В.Ю. Ляпидевский[1], В.С. Тихонов[2], О.С. Букашкина[3]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева РАН, Новосибирск*

[2]*Везерфорд, Москва,*

[3]*Везерфорд, Санкт Петербург*

vadim.tikhonov@weatherford.com

Рассмотрены модели газожидкостного течения в скважине. Разработаны численные схемы расчета течений на базе модели приведенного дрейфа и модели кинематических волн. Показано, что упрощенная кинематическая модель позволяет проводить расчеты в многократно ускоренном масштабе времени и с достаточно высокой точностью без ограничения на характер изменения во времени расхода газа, проникающего из породы в скважину. На базе модели предложен алгоритм управления давлением на забое путем изменения противодавления на устье.

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ С ФИКСИРОВАННОЙ ТРУБКОЙ ТОКА В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ

**А.Б. Мазо, К.А. Поташев**

*Казанский федеральный университет, Казань*

kpotashev@mail.ru

Работа посвящена оценке достоверности гипотез нового оперативного и в то же время достаточно точного подхода к использованию теории фиксированной трубки тока для анализа и локального проектирования разработки нефтяного пласта и геолого-технических мероприятий. Выполнена оценка достоверности гипотезы о неизменности формы трубок тока по вертикали при неоднородной структуре пласта и несовершенных по степени вскрытия пласта скважинах, а также продемонстрирована корректность построения линий и трубок тока в рамках решения плоской задачи стационарной фильтрации в осредненном по толщине пласте. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности 9.9786.2017/8.9.

## ЭФФЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ТРАССЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МНОГОЗОННОГО ГРП НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

**А.Б. Мазо, К.А. Поташев**

*Казанский федеральный университет, Казань*

kpotashev@mail.ru

Описана эффективная модель двухфазной многокомпонентной фильтрации для интерпретации индикаторных исследований многозонного гидроразрыва нефтяного пласта (МГРП) на горизонтальных скважинах. Исследования состоят в закачке индивидуальных индикаторов в каждую трещину МГРП и последующем измерении их концентрации в отбираемой жидкости. Задача раскладывается на набор одномерных задач фильтрации в пласте вблизи трещин, двумерные задачи для давления в каждой трещине и одномерную задачу течения в скважине. Решение обратной задачи сводится к уточнению геометрии и проницаемости каждой трещины для определения ее продуктивности и обводненности. Работа выполнена за счет субсидии, выделенной КФУ для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности 9.9786.2017/8.9.

## ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ГАЗОПРОВОДОВ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ (15-30 МПА), ПРЕОДОЛЕВАЮЩИХ ГЛУБОКОВОДНЫЕ МОРЯ И ВЫСОКОГОРНЫЕ ПЕРЕВАЛЫ

**И.Т. Мусаилов, М.В. Лурье**

*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва*

imusailov@gmail.com

В докладе представлена теория и методика расчета режимов эксплуатации газопроводов высокого и сверхвысокого давления, проложенных в сложных неизотермических условиях, обусловленных большими перепадами высотных отметок. Рассмотрены особенности транспортировки газа по глубоководному газопроводу «Турецкий поток». Показано, что на участках спуска газопровода на дно и его последующего подъема со дна на сушу, давление и температура газа могут иметь весьма большие градиенты. Кроме того, охлаждение газа в результате его подъема может достигать значений достаточных для обмерзания трубопровода. Проводятся соответствующие расчеты по результатам которых делаются обобщающие выводы и даются рекомендации.

## ОБРАТНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ОКОЛОСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА

**Л.А. Назарова[1], Л.А. Назаров[1], Н.А. Голиков[2], А.А. Скулкин[1]**

[1]*Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск*

[2]*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск*

lanazarova@ngs.ru

С помощью обратного анализа данных термобарических испытаний (ступенчатый нагрев нагруженных образцов баженитов) установлена связь между деформационными свойствами пород-коллекторов и температурой, на основе которой выведена зависимость проницаемости от температуры и среднего напряжения. Создана установка для фильтрационных испытаний нагруженных по боко-

вой поверхности цилиндрических образцов с центральным отверстием. Изготовлены образцы-диски из искусственного геоматериала (песок и связующее - криогель), проведены лабораторные эксперименты. Интерпретация их результатов позволила найти значенияэмпирическихпараметроввэкспоненциальной зависимости проницаемости отэффективного напряжения. Работы выполнены при поддержке проектов ФНИ № АААА-А17-117122090002-5 и РФФИ № 19-05-00689.

## НАПОЛНЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДАМИ «КУПОЛА – СЕПАРАТОРА» С ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫМ УТЕПЛИТЕЛЕМ

**А.А. Насыров, И.А. Чиглинцев**

*Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск*

nasaza@mail.ru

В работе рассматриваются теоретические основы функционирования утеплённого «купола-сепаратора», предназначенного для сбора и последующей отгрузки газонефтяных выбросов в случае разрыва скважины вблизи дна глубоких водоемов, когда термобарические условия благоприятны для образования газогидрата. Построена математическая модель, описывающая процесс наполнения купола углеводородами при условиях гидратообразования, а также описана динамика изменения температуры фаз.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ

**В.В. Неверов[1,2], В.Ю. Ляпидевский[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

neverovvladim@gmail.com

Предложена модель, описывающая формирование волнового пакета при остановке закачки жидкости в скважине, соединенной с резервуаром. Предложен алгоритм численного решения задачи о гидроударе в скважине. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. По результатам сравнения предложен набор параметров, обеспечивающих соответствие расчетов и экспериментальных данных.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027).

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

**Д.А. Неганов**

*ООО «НИИ Транснефть», Москва*

NeganovDA@niitnn.transneft.ru

Рассматривается обобщенная структура нормативного определения параметров прочности магистральных трубопроводных систем, сложившаяся в нашей стране и за рубежом на протяжении 6 – 7 десятилетий. Основное внимание уделено магистральным трубопроводам для транспортировки нефти и нефтепродуктов. В основу расчетного анализа прочности положены два метода – метод по допускаемым напряжениям (принятый в зарубежной практике) и расчет по предельным состояниям и предельным сопротивлениям (принятый в отечественной практике). Наиболее развитым и применяемым является детерминированный расчет прочности на стадии проектирования. При этом решаются прямые основные задачи определения толщины стенки трубопровода по заданным давлениям, пропускной способности труб и выбранным трубным сталям. Этот же метод используется на стадии поверочных расчетов прочности строящихся и большинства эксплуатируемых трубопроводов. В тех случаях, когда необходимо расчетное обоснование прочности функционирующих трубопроводов при отклонениях от проектных решений и при возникновении дефектности труб за пределами установленных норм, необходимо проведение поверочных расчетов с использованием фактической статистической информации по всем расчетным параметрам. Одной из решаемых при этом задач становится назначение всех основных расчетных параметров по полученной статистической информации. В этих случаях характерно сохранение нормативных запасов прочности. Для наиболее ответственных участков трубопроводов статистический анализ прочности может оказаться недостаточным и неприемлемым. Тогда требуются вероятностные оценки прочности с использованием функций распределения эксплуатационной нагруженности и механических свойств трубных сталей по параметру времени эксплуатации. Для этих ситуаций появляется возможность изменения запасов прочности для требуемых вероятностей возникновения опасных состояний.

## К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ КРИЗИС ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ

**А.Г. Потапов**

*Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», Москва*

gregor1108@yandex.ru

При ламинарном течении вязко-пластичных жидкостей в центре потока существует квази-твердое «ядро», внутри которого радиальный градиент скорости равен нулю. С увеличением радиуса «ядра» потока и уменьшением градиентной зоны течения кризис наступает при более высоком значении критического числа Рейнольдса. Кризис обусловлен нарушением баланса между положительным производством энтропии и отрицательным потоком энтропии, а также кинетическим нагревом, связанным с вязкой диссипацией энергии, происходящим на границе слоев жидкости, движущихся в градиентной зоне с различными скоростями относительно друг друга. На границе повышается температура и понижается вязкость, что может вызывать «расслоение» потока. Уменьшение градиентной зоны приводит к задержке кризиса.

## ОЦЕНКА БЛОКИРУЮЩЕЙ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕПЯТСТВИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ТРУБОПРОВОДА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ

**А.В. Семёнова[1], Д.Р. Вафин[2], С.Ф. Урманчеев[3]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2]*ООО «НИИ Транснефть», Москва*

[3]*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа*

semyonovaav@yandex.ru

Рассматривается процесс преодоления трубопроводом каменистого препятствия при протаскивании через канал. В зависимости от размеров канала и трубопровода определяется максимально допустимый размер препятствия, которое трубопровод может преодолеть, не упираясь в верхнюю часть канала. Для решения этой задачи трубопровод условно разделяется на два участка: участок, находящийся до препятствия и опирающийся на него, и свободный участок, находящийся после препятствия. Исходя из уравнений равновесия моментов, а также из уравнения изгиба балки проводится оценка величины препятствия.

## ТРАНСПОРТ ПРОПАНТА В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА: УТЕЧКИ В ПЛАСТ, НЕУСТОЙЧИВОСТЬ САФФМАНА-ТЕЙЛОРА

**А.М. Скопинцев[1,2], Е.В. Донцов[3], П.В. Ковтуненко[1,2]**

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3]*W.D. Von Gonten Laboratories, Houston, USA*

sovietedge@gmail.com

Предложена сопряженная модель распространения трещины гидроразрыва пласта и переноса пропанта. Используется P3D модель для распространения трещины. Модель течения несжимаемой жидкости в трещине основана на законе сохранения массы в приближении теории смазки и также учитывает утечку в породу. Динамика вязкой жидкости с пропантом описывается с использованием эффективной вязкости. Обсуждаются численная реализация, тестирование алгоритмов, влияние расписания закачки на физические процессы в трещине.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №14.581.21.0027 от 03.10.2017 г., уникальный идентификатор RFMEFI58117X0027).

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА МАССЫ В ЩЕЛИ ПРИ ИСПАРЕНИИ ЕЕ СТЕНОК

**А.А. Таирова[1,2], Г.В. Беляков[1]**

[1]*Институт динамики геосфер РАН, Москва*

[2]*Московский физико-технический институт (НИУ), Москва*

moscouposte@gmail.com

В работе рассматривается течение разогретых газовых потоков сквозь щель, с последующим уносом материалов ее поверхности. Щель создавалась между горизонтальными пластинами оргстекла, при нагреве разлагающегося на жидкую и газовую фазы. В результате действия потока горячих газов материал поверхности щели испарялся и уносился потоком. Унесенная масса была измерена. Также были измерены скорости потоков. Определено изменение скорости потока при известном подведенном количестве тепла.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0146-2019-0007.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ С МНОГОСТАДИЙНЫМ ГИДРОРАЗРЫВОМ ПЛАСТА

**А.С. Топольников[1], В.Г. Михайлов[1], А.Р. Яруллин[2]**

[1]*ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа*

[2]*Башкирский государственный университет, Уфа*

TopolnikovAS@ufanipi.ru, TopolnikovAS@bashneft.ru

Работа посвящена решению задачи по определению расходов воды, нефти и газа из источников притока в горизонтальной добывающей скважине, расположенных в точках проведения гидравлического разрыва пласта, по известному распределению параметров многофазного потока в хвостовике скважины. Для моделирования течения многофазного потока в скважине предложена одномерная математическая модель, которая учитывает режим течения и теплообмен с окружающей породой. Сравнение результатов расчетов по модели с экспериментальными данными на стенде при различных расходах компонентов смеси и углах наклона трубы к горизонтали показало удовлетворительное совпадение, в отличие от расчетов по другим известным моделям.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ У УСТЬЯ СКВАЖИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**М.Ю. Филимонов**[1,2], **Н.А. Ваганова**[1,2]

[1]*Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург*

[2]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

fmy@imm.uran.ru

Актуальными являются вопросы, связанные с прогнозированием устойчивости различных инженерных сооружений в зонах распространения вечной мерзлоты при воздействии на окружающую среду различных источников тепла, которые могут находиться, как внутри грунта, так и на его поверхности. В работе приведены результаты компьютерного моделирования эксплуатации добывающих скважин при различных режимах их эксплуатации на северных нефтегазовых месторождениях. Рассмотрены различные варианты эксплуатации добывающих скважин, включая режимы остановки и, как следствие, начало обратного промерзания грунта, которое может приводить к разрушению скважин.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-07-00435.

## РЕОЛОГИЯ И МИКРОСТРУКТУРА ДВУХФАЗНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

**В.В. Шелухин**, **В.В. Неверов**

*Институт гидродинамики СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

shelukhin@hydro.nsc.ru

На основе термодинамических принципов разработана математическая модель двухфазной гранулированной жидкости. Первая фаза представляет собой вязкую ньютоновскую жидкость. Вторая, гранулированная, неньютоновская фаза описывается в рамках континуума Коссера. Модель прошла бенчмарк-тесты, связанные с лабораторными эффектами Зегре-Зильберберга и Бойкотта. Если учесть предельное напряжение сдвига в гранулированной фазе, то наблюдается эффект бриджинга, т.е. гранулированная фаза стоит, а вязкая течет, если градиент давления достаточно мал. В случае, когда частицы гранулированной фазы имеют форму стержней, установлены пульсации давления при закачке пропанта с постоянным расходом.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации №14.W03.31.0002.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ ИЗ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ НЕФТЯНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

**Р.Н. Якубов**, **Л.Е. Ленченкова**, **Х.И. Акчурин**, **П.Н. Шадрина**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

rnyakubov@gmail.com

В работе рассматриваются методические подходы к повышению эффективности добычи нефти из карбонатных коллекторов, основанные на моделировании процессов внутрипластовой водоизоляции и интенсификации добычи нефти в обводненных скважинах, эксплуатирующих неоднородные сложнопостроенные коллекторы. Авторами предложены математические модели процессов, происходящих непосредственно в призабойной зоне пласта при рассматриваемых видах воздействия, и обоснованы допущения, принимаемые при их реализации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-29-24086 мк.

## Симпозиум «СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТРИБОТЕХНИКЕ»

### КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОЦЕССАХ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

**А.Н. Абрамов, Д.Г. Тюленев, В.Ю. Шолом, Д.Ф. Пузырьков**

*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», г. Уфа*

abramov@rosoil.ru

Представлен комплекс лабораторных и стендовых испытаний смазочных материалов для процессов металлообработки, с помощью которого оценку качества различных смазочных материалов определяют по 124 показателям, из которых триботехнические свойства оценивают по 54 показателям, физико-химические свойства по 46 показателям, механические свойства материаловпо 24 показателям. Лабораторный комплекс дает возможность оперативно оценивать влияние композиций смазочных материалов на основные триботехнические, физико-химические и эксплуатационные характеристики разрабатываемого продукта, что позволяет прогнозировать поведение последнего в условиях различных производственных процессах металлообработки.

### ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ЗАГОТОВКИ

**А.Н. Абрамов, Д.Г. Тюленев, Д.Ф. Пузырьков**

*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», г. Уфа*

abramov@rosoil.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию различных смазочных материалов на шероховатость поверхности заготовок из сплава АД-31 при волочении через роликовую волоку. Показано, что за счет применения эффективных смазочных материалов, можно снизить шероховатость поверхности деформированной заготовки на два класса по ГОСТ 2799-73.

### ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ NIP ПОКРЫТИЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

**И.Р. Асланян[1], Л.Ш. Шустер[2]**

*[1]ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»), Москва,*

*[2]Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

as-irina@rambler.ru

В работе рассмотрены особенности изнашивания электролитических NiP покрытий при различных условиях трения: непрерывном скольжении, фреттинге и фреттинг-коррозии. Показано, чтопонимание условий трения покрытий, позволит оценить и сравнить отдельное и совместное влияние различных факторов на процессы трения и изнашивания покрытий в различных условиях непрерывного скольжения, фреттинга и фреттинг-коррозии, а также подобрать материалы, минимизирующие износ.

### ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

**И.Б. Белов[1], А.Н. Абрамов[1], О.П. Ширяев[2], Д.П. Канаев[2]**

*[1]«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», г. Уфа*

*[2] ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод»*

rosoil@rosoil.ru

Рассмотрена проблема качества смазочных материалов для процессов металлообработки на примере использования СОЖ «МР-7» разных производителей в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод». Авторами статьи предложено решение вопросов качества смазочных материалов в современных условиях.

### СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ «РОСОЙЛ»

**И.Б. Белов, В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов**

*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», г. Уфа*

rosoil@rosoil.ru

Приведено описание создания и развития производства смазочных материалов Росойл.Рассмотрены основные этапы становления Технопарка «ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ»как научно-производственного предприятия. Показан ассортимент разработанных и производимых в Технопарке смазочных материалов.

## СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОСМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ

**М.А. Броновец**

*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва*

brnovets@ipmnet.ru

Вдокладе содержатся характеристики смазочных материалов, применяемых в узлах трения космических изделий, результаты их лабораторных и натурных испытаний. Даны классификации масел, пластичных смазок и твёрдосмазочных покрытий. Показаны особенности применения смазочных материалов в открытом космосе. Приведены рекомендуемые области применения смазочных материалов в космических изделиях и возможные сроки их использования. Описаны перспективы испытаний смазочных материалов в открытом космосе на Международной космической станции. Приведены результаты испытаний самосмазывающихся материалов на орбите Луны и изложены требования к работоспособности узлов трения космических изделий на лунной поверхности.

## АНТИФРИКЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ И ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ЭТОГО ПОКРЫТИЯ МОЛИБДЕНОМ И КРЕМНИЕМ НА СМАЗОЧНУЮ СПОСОБНОСТЬ МАСЕЛ

**И.А.Буяновский[1], В.Д.Самусенко[1], В.А.Левченко[2]**

[1]*Институт машиноведения РАН, Москва*

[2] *Химфак МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва*

buyan37@mail.ru

В докладе приведены результаты проведённых в ИМАШ РАН исследований влияния твёрдого покрытия монокристаллического углерода, обладающего свойствами ориентанта, .на смазочную способность масел. Особое внимание уделено факту, что заметную роль в условиях граничной смазки химически активными средами играет легирование этих покрытий такими элементами, как вольфрам, молибден, кремний и т.д.Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00825.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В АО «БЕЛЗАН»

**Т.Ш. Галиахметов**

*Акционерное общество «Белебеевский завод “Автонормаль”»*

t.galiakhmetov@belzan.ru

Выполнено исследование технологии подготовки нержавеющей стали к холодной объемной штамповке (ХОШ). Исследованы три варианта технологии изготовления болтов с шестигранной головкой из нержавеющих сталей аустенитного и мартенситного классов: без редуцирования стержня под накатку резьбы, с однократным и двухкратным редуцированием. Все три варианта изготовления применены в АО «БелЗАН». Исследованы СОТС для холодной высадки нержавеющей стали.

## МНОГОКОМПОНЕНТНЫЙ КОМПАУНДИРОВАННЫЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

**Д.В. Глазунов**

*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону*

glazunovdm@yandex.ru

Экспериментальными исследованиями, реализованными в соответствии с симплекс-решетчатым планом состав–свойство, осуществлена многофункциональная оптимизация компаундированного состава смазочного материала (битума, стеариновой кислоты и пеностекла) по коэффициенту трения контакта «колесо-рельс», интенсивности изнашивания колес подвижного состава и расходу смазочного материала. Анализом регрессионных моделей третьего порядка определены рациональные диапазоны варьирования процентного содержания компонентов в смазочном материале, обеспечивающие минимальную интенсивность изнашивания трибосопряжения «гребень колеса – рельс» 0,371 мм/$10^4$ км при следующем соотношении компонентов: пеностекло 11%, стеариновая кислота 32%, битум 57% в смазочном компаунде.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗКИ В ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПОЛОСЫ

**Р.Р. Дема, М.В. Харченко, О.Р. Латыпов**

*ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»*

demarr78@mail.ru

В данной статье пойдет речь о проведенных опытно-промышленных испытаниях отечественного смазочного материала на непрерывном широкополосном стане 2000 горячей прокатки ПАО «ММК». Приведены результаты влияния смазочного материала на энергосиловые параметры процесса прокатки, отмечены существующие недостатки в работе системы подачи технологической смазки.

## ЗАВИСИМОСТЬ ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ОТ СОВМЕСТИМОСТИ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**И.И. Емаев[1], Н.К. Криони [1], Б.Ш. Минасов [2], Л.Ш. Шустер [1], Р.Р. Якупов [2]**

[1]*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2]*Башкирский государственный медицинский университет, Уфа*

okmim@ugatu.ac.ru

Экспериментально получена функциональная зависимость скорости изнашивания узла трения «головка – вкладыш» эндопротезов из различных материалов от триботехнического параметра $\beta$ (индекса совместимости трущихся поверхностей), выражающего степень влияния давления на прочность $\tau_п$ адгезионных связей на срез. Это позволяет уже на стадии конструирования эндопротезов и выбора технологии артропластики прогнозировать эксплуатационную долговечность и надежность эндопротезов по износостойкости.

## ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА СОВМЕСТИМОСТЬ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ ИЗНАШИВАНИЕ

**И.И. Емаев[1], Н.К. Криони [1], Р.Г. Нигматуллин [2], Л.Ш. Шустер [1]**

[1] *Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа*

[2] *ООО «Химмотолог», Уфа*

okmim@ugatu.ac.ru

Установлена функциональная зависимость интенсивности изнашивания более мягкой детали пары трения из металлических материалов от пьезокоэффициента прочности адгезионных связей на срез (индекса совместимости трущихся поверхностей) при различных смазочных материалах и их отсутствии. Получено, что наибольшую износостойкость при температуре до 150°С обеспечивает применение пластичного смазочного материала, модифицированного углеродным каркасом.

## ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ «РОСОЙЛ»

**А.М. Казаков, В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов, Д.Г. Тюленев, Д.Ф. Пузырьков**

*Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ, Уфа*

rosoil@rosoil.ru

В статье представлены результаты разработки и применения полифункциональных смазочных материалов марки «Росойл»:консервационно-технологические смазочные материалы; масла для металлообработки и смазывания узлов трения промышленного оборудования с совмещенной системой смазки. Показаны преимущества и область применения полифункциональных смазочных материалов.

## КОНСЕРВАЦИОННЫЕ МАСЛА «РОСОЙЛ» ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ ОТ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ

**А.М. Казаков, В.Ю. Шолом, О.П.Корнилова, Ф.Н. Фазлиахметов**

*Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ, Уфа*

rosoil@rosoil.ru

В статье представлены результаты многолетнего опыта разработки и применения консервационных масел марки «Росойл». Обозначены проблемы, возникающие у потребителей масел при выборе средства для защиты металлических изделий от коррозии, и даны рекомендации для их решения. Представлены результаты сравнительных лабораторных и натурных испытаний защитных свойств консервационных масел отечественных и зарубежных производителей.

## СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОПИТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ СЕРДЕЧНИКОВ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

**О.Л. Крамер[1], А.С. Трофимов[1], Е.Ю.Кушкина[2] , О.И.Ярославцев[3]**

[1]*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ»*

[2]*ТС Филиал "Волгоградский" АО "Северсталь канаты", г. Волгоград*

[3]*ООО «Кона Тэкс», г. Волгоград*

rosoil@rosoil.ru

Описан процесс разработки и внедрения смазочной композиции для пропитки органических сердечников стальных канатов. Представлены результаты испытаний по подбору эффективного биоцида в составе для пропитки органических сердечников стальных канатов. Описаны результаты лабораторных испытаний эффективности противогнилостного действия пропитывающих составов. Показано преимущество модификации смазочного материала для пропитки органических сердечников стальных канатов с расширенным температурным диапазоном применения по показателю морозостойкость.

## ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ - ОРИЕНТАНТОВ НА СМАЗОЧНУЮ СПОСОБНОСТЬ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ МАСЕЛ

**В.А.Левченко [1], И.А.Буяновский [2], В.Д.Самусенко [2], В.Н.Матвеенко [1]**

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва*

vladlev@mail.ru

Исследовано влияние композиционных покрытий-ориентантов на смазочную способность граничных слоев масел. Отмечено, что наноструктурные композиционные покрытия представляют собой новый класс материалов, обладающих уникальными механическими и ориентационными свойствами. Показано, что наиболее перспективными сверхтвердыми покрытиями являются композиционные покрытия на основе алюмонитрида титана (AlTiN) и алмазоподобного углерода с высоким содержанием $Sp^3$ фазы, обеспечивающие высокие физико-химические, прочностные и триботехнические свойства.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00591.

## ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

**Е.В. Лопатина[1], М.П. Барышников[1], А.С. Ишимов[1]**

[1]*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск*

lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

В настоящее время большое внимание уделяется поверхностному модифицированию сплавов, так как свойства изделий определяются характеристиками поверхности и поверхностного слоя. Значительный интерес вызывают технологии, которые позволяют получить твердую износостойкую оксидную керамику с высокой адгезией. К их число относиться метод микродугового оксидирования поверхности. В данной статье исследовано влияние плазменно-электролитическое оксидирование на коррозионную стойкость металла Al 7020, также построены и исследованы потенциодинамические поляризационные испытания и электрохимическая импедансная спектроскопия.

## ДИФФУЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОТС С ТРИБОАКТИВНЫМИ ПРИСАДКАМИ

**В.В. Новиков, С.А. Сырбу**

*Ивановский государственный университет, Иваново*

novikov-ww@mail.ru

Трибологическая ситуация в контактной зоне между стружкой и инструментом может быть удовлетворительна описана трехзонной моделью с разделением на зоны адгезии, зоны схватывания и зоны трения. Получено выражение, связывающее коэффициент трения при резании с распределением зон трения вдоль контактной поверхности, проанализированы причины возникновения зоны адгезии, сделана оценка прочности граничных слоев на сдвиг. Построена модель, описывающая кинетику формирования граничного смазочного слоя в зоне трения с учетом размеров и формы молекул ПАВ и их концентрации. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с данными эксперимента.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-43-370027118.

## СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРИБОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕЗОГЕННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

**В.В. Новиков, С.А. Сырбу, К.С. Бурченков**

*Ивановский государственный университет, Иваново*

novikov-ww@mail.ru

Проведены исследования смазочной способности п-н-пропилоксибензойной кислоты, п-н-пропилокси-п'-цианобифенила и их эквимолярной смеси в условиях граничного трения. Установлено, что исследуемые присадки обладают высокой трибоактивностью, которая определятся химическим строением молекулы и концентрацией присадки в растворе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-43-370027118.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

**Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина**

*Брянский государственный технический университет, Брянск*

epamfilov@yandex.ru

Рассмотрены конструкции антифрикционных вкладышей подшипников скольжения из композиционных материалов с использованием модифицированной древесины и металлической фазы. Предложены теплоаккумулирующие наполнители, выполненные в виде капсул, позволяющие улучшить триботехнические характеристики композиционных материалов, также рассмотрены возможности применения новых армированных древесно-металлических вкладышей, позволяющих увеличить прочность, износостойкость и теплоотводящую способность подшипников скольжения, эксплуатируемых в узлах трения технологических машин.

## ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ МЕДНОЙ И АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОВОЛОКИ

**Д.Ф. Пузырьков[1], В.Ю. Шолом[1], С.А. Саранцева[1],В.Ф. Ключников[2], А.А.Зуев[2], Д.Г. Скрипачев[2]**

*[1]«Технопарк ХТЦ УАИ – РОСОЙЛ», г. Уфа*

*[2]АО «Самарская кабельная компания», г. Самара*

rosoil@rosoil.ru

Представлены результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний СОЖ «Росойл-521» на операциях волочения медной и алюминиевой проволоки. Результаты испытаний показали что СОЖ «Росойл-521» по своей эффективности не уступает аналогичным высокоэффективным импортным СОЖ на операции среднего волочения медной проволоки, при этом являясь значительно более привлекательной по цене.СОЖ «Росойл-521» является перспективной в плане замены масляных смазочных материалов для волочения алюминиевой проволоки на водные эмульсии.

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ СМАЗОК РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВАДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

**В.Д. Самусенко, А.Ю. Албагачиев, И.А. Буяновский**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

samusenkovd@gmail.com

В статье представлены результаты исследования температурной стойкости вакуумных смазок российского производства, которые могут использоваться в узлах трения космических аппаратов. Показано, что смазки на основе перфторполиэфиров имеют близкие антифрикционные свойства и обеспечивают низкие значения коэффициента трения в диапазоне температур 30-300 °С. Лучшую стойкость к воздействию высоких температур показали смазки Аметист и Ника.

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

**В.И. Семенов[1], Г.Н. Алешин[1], А.Г. Рааб [1], Н.Т Тончев [2], В.В. Камбуров [3]**

*[1]Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, Уфа*

*[2]Высшее Транспортное Училище им. Тодора Каблешкова, София*

*[3]Технический Университет – София,*

semenov-vi@rambler.ru

В работе представлены результаты оценки трибологических свойств проволочных образцов из низкоуглеродистой стали 10 с различной микроструктурой исходной заготовки. Показано, что проволока с ультрамелкозернистой структурой, полученной из заготовки после интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования по схеме Conform имеет более высокую износостойкость по сравнению с проволокой, изготовленной волочением из крупнозернистой заготовки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № № 17-08-00720.

## ГИДРОФОБНЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

**А.С. Трофимов[1], О.Л. Крамер[1] , В.Ю. Шолом [1], В.В. Баннов [2], Т.В. Немцева[2] А.И. Шерстников[3]**

*[1] «Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», Уфа*

*[2]АО «Самарская кабельная компания», г. Самара*

*[3]ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания»,г. Самара*

rosoil@rosoil.ru

Описан процесс разработки и внедрения гидрофобного заполнителя для кабельной промышленности. Приведены результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний. Показано, что разработанная композиция гидрофобного заполнителя соответствует требованиям технического задания АО «СКК» и превосходит импортный и российский аналоги по морозостойкости, температуре хрупкости и температуре сползания, что свидетельствует о более широком температурном диапазоне потенциального применения и особенно актуально в условиях контрастного российского климата.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

**Д.Г. Тюленев, А.А. Калимуллин, В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов**

*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», Уфа*

rosoil@rosoil.ru

Приведены результаты испытаний охлаждающей способности смазочно-охлаждающих жидкостей с помощью установки для определения охлаждающих характеристик технологических сред дополнительно оснащенной механизмом переноса термодатчика. Показана существенная разница охлаждающих свойств различных смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых в процессах металлообработки.

## СМАЗОЧНО - ОХЛАЖДАЮЩАЯ ЖИДКОСТЬ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ И КАЛИБРОВКИ ПРОВОЛОКИ

**Ф.Н. Фазлиахметов[1], В.Ю. Шолом[1], А.М. Казаков [1],Л.Э.Пыхов[2], Л.Г.Евдокимова[2]**

[1] *«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ, Уфа»*

[2]АО «Белорецкий металлулгический комбинат», г. Белорецк

rosoil@rosoil.ru

Представлены результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний синтетической смазочно-охлаждающей жидкости «Росойл-Синтетик», предназначенной для волочения медной, углеродистой и легированной стальной проволоки без покрытия, а также стальной проволоки с медным, цинковым и фосфатным покрытием.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

**М.В. Харченко, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов**

*ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»*

kharchenko.mv@bk.ru

В данной работе приведены результаты проведенных лабораторных исследований направленных на изучение адгезионной способности базового смазочного материала в условиях его применения в двухроликовой тяжелонагруженной фрикционной паре трения. Определено, что на формирование устойчивой пленки смазочного материала влияют как энергосиловые, так и скоростные условия контактного взаимодействия.

## ВЛИЯНИЕ СМАЗКИ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В КОРРОЗИОННО-АКТИВНЫХ СРЕДАХ

**В.Ю. Шолом, В.П. Головин, А.Н. Абрамов, О.Л. Крамер, О.П. Корнилова**

*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», Уфа*

rosoil@rosoil.ru

В работе приведены результаты исследования влияния различных смазочных материалов на выносливость стального каната, изготовленного по ГОСТ 2688-80 при эксплуатации в коррозионно—активной среде, в частности в морской и пресной среде. Установлено, что периодическое воздействие морской воды на канат многократно (от 249% до 942%) снижает выносливость каната в зависимости от используемого смазочного материала, по отношению к испытаниям по ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость» и пропорционально уменьшает его технический ресурс.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА КАНАТНЫХ СМАЗОК

**В.Ю. Шолом, В.П. Головин, А.Н. Абрамов, О.Л. Крамер, А.С. Трофимов**

*«Технопарк ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», Уфа*

rosoil@rosoil.ru

В работе представлен сравнительный анализ методов испытаний низкотемпературных свойств канатных смазок**.** Показано, что смазки, имеющие неудовлетворительные низкотемпературные свойства, определенные по ГОСТ 20458-89, существенно сокращают срок службы канатов, эксплуатируемых при низких температурах, в отдельных случаях даже по отношению к не смазанному канату.

СОДЕРЖАНИЕ


| | Стр. |
|---|---|
| Пленарные доклады……. | 4 |
| Секция I. Общая и прикладная механика…….. | 7 |
| Секция II. Механика жидкости и газа…… | 11 |
| Секция III. Механика деформируемого твердого тела…… | 13 |
| Подсекция I - 1. Аналитическая механика и устойчивость движения……... | 17 |
| Подсекция I - 2. Управление и оптимизация в механических системах…… | 25 |
| Подсекция I - 3. Колебания механических систем……... | 35 |
| Подсекция I - 4. Механика систем твердых и деформируемых тел…… | 45 |
| Подсекция I - 5. Механика машин и роботов…… | 53 |
| Подсекция I – 6. Механика космического полета…… | 63 |
| Подсекция II - 1. Гидродинамика……... | 73 |
| Подсекция II - 2. Аэродинамика и газовая динамика…….. | 93 |
| Подсекция II - 3. Устойчивость течений и турбулентность…… | 110 |
| Подсекция II - 4. Физико-химическая механика сплошных сред……... | 130 |
| Подсекция II - 5. Механика многофазных сред…… | 148 |
| Подсекция II – 6 Проблемы фильтрации…….. | 167 |
| Подсекция III - 1. Теория упругости и вязкоупругости……... | 178 |
| Подсекция III – 2. Теория пластичности и ползучести…… | 197 |
| Подсекция III - 3. Динамические процессы в деформируемых средах…….. | 211 |
| Подсекция III - 4. Механика разрушения и повреждений……... | 221 |
| Подсекция III - 5. Механика контактного взаимодействия……. | 247 |
| Подсекция III-6. Механика неоднородных сред. Композиты, моментные, градиентные, микрополярные среды, механохимия…… | 260 |
| Подсекция III-7. Неклассические модели механики сплошных средю……. | 272 |
| Подсекция III-8. Проблемы оптимизации, идентификации и надежности…… | 285 |
| Подсекция III-9. Проблемы мезо и наномеханики……... | 292 |
| Симпозиум «Механика природных процессов»……... | 302 |
| Симпозиум «Биомеханика»…… | 311 |
| Симпозиум «Механика взаимодействия жидких, газообразных и твердых тел»…. | 325 |
| Симпозиум «Механика процессов нефтедобычи и транспортировки нефти»…….. | 331 |
| Симпозиум «Смазочные материалы в триботехнике»…… | 341 |

## ОРГАНИЗАТОРЫ

Российский Национальный комитет по теоретической и прикладной механике

ИПСМ РАН

Башкирский государственный УНИВЕРСИТЕТ

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

ИМех УФИЦ РАН

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Академия наук Республики Башкортостан

## ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

Минобрнауки РФ

Правительство РБ

ФПРНРБ

РФФИ
Российский фонд фундаментальных исследований

## СПОНСОРЫ И БЛАГОТВОРИТЕЛИ

Skoltech
Сколковский институт науки и технологий

ЦАГИ

FIDESYS

Газпром трансгаз Уфа

Skoltech

Сколковский институт науки и технологий

www.skoltech.ru

Сколковский институт науки и технологий (Сколтех) – негосударственный образовательно-исследовательский институт, который находится в Сколково (Россия, Московская область). Созданный в 2011 году при участии Массачусетского технологического института (MIT), Сколтех готовит новые поколения исследователей и предпринимателей, продвигает научные знания и содействует технологическим инновациям с целью решения важнейших проблем, стоящих перед Россией и миром. Институт строит свою работу, опираясь на лучшие традиции российских и международных образовательных и исследовательских практик, делая особый акцент на предпринимательской и инновационной деятельности.

Модель Сколтеха предусматривает интеграцию образования и исследований, причем как фундаментальных, так и прикладных. Институт тесно связан с промышленной и предпринимательской экосистемой, что позволяет развивать качественные исследования и генерировать приток инноваций в экономику.

Миссия Сколтеха заключается в обучении студентов, создании знаний и продвижении технологий для решения ключевых научных, технологических и инновационных задач как в России, так и во всём мире. Обучение по каждому из направлений завершается присвоением степени магистра или PhD Сколтеха.

Девять центров исследований, образования и инноваций (ЦНИО) Сколтеха осуществляют одну или несколько научно-образовательных программ каждый. Центры ведут работу по своей тематике исследований в рамках совместной распределённой исследовательской программы Сколтеха, международных и российских институтов. Каждый из Центров располагает как физическими, так и виртуальными компонентами. Виртуальный компонент центров заключается в постоянном исследовательском сотрудничестве с институтами-партнерами, в ходе которого исследователи работают на территории своих институтов, но в рамках общей тематики. Преподавательский состав Сколтеха, его сотрудники и студенты ведут работу в лабораториях в Сколтехе.

Одним из таких центров является **Центр проектирования, производственных технологий и материалов.**

**Директор Центра**
*Профессор И.Ш. Ахатов*

## Центр проектирования, производственных технологий и материалов

www.crei.skoltech.ru/cdmm

cdmm@skoltech.ru

Центр проектирования, производственных технологий и материалов был создан в марте 2015 как Центр Науки Инноваций и Образования (ЦНИО) Сколковского института науки и технологий, который проводит фундаментальные и прикладные исследования, направленные на разработку и внедрение новых цифровых моделей проектирования и производства для передовых материалов, конструкций и инженерных систем с жизненным циклом, механическими и физическими характеристиками, требуемыми в высокотехнологичных отраслях.

## Лаборатории Центра:

### Композитных материалов и конструкций

Производство композитных материалов:
- Вакуумная инфузия
- Пультрузия
- Намотка
- Прессование

Матрица: термо-термопласты

Армирование: стекло и углеродные волокна, микро- и нано-наполнители

### Аддитивного производства

3D печать:
- Пластики
- Металлы
- Керамика

Аддитивные технологии:
- Порошкообразное сплавление
- Селективное лазерное спекание
- Стереолитография
- Прямое энергетическое осаждение

### Газотермического напыления и функциональных покрытий

Технологии нанесения покрытий:
- Атмосферное плазменное напыление
- Сверхзвуковое газопламенное напыление
- Электродуговое проволочное напыление
- Холодное газодинамическое напыление
- Газопламенное напыление

### Кибер-физических систем

- Технологии PLM для цифрового проектирования, производства и контроля состояния при эксплуатации
- Мета-моделирование, исследование пространства параметров, оптимизация
- Разработка "Цифровых двойников" оборудования и сложных изделий, предиктивная и прескрептивная аналитика состояния

### Механических испытаний материалов

- Проверка механических свойств материалов
- Характеристика теплового отклика материалов
- Акустическая реакция и реология
- Кинетика термического разложения

### Микро- и нано-механики

- Изучение фундаментальных физических процессов, ответственных за микро- и наноструктурные свойства материалов
- Специальные экспериментальные методы испытаний материалов в микро- и нано- масштабах

**Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ)** – крупнейший государственный научный центр авиационной и ракетно-космической отрасли Российской Федерации, где успешно решаются сложнейшие задачи фундаментального и прикладного характера в областях аэро- и гидродинамики, аэроакустики, динамики полета и прочности конструкций летательных аппаратов, а также промышленной аэродинамики. Основан в 1918 году по инициативе выдающегося ученого-механика Николая Егоровича Жуковского, стоявшего у истоков аэродинамики.

Институт осуществляет государственную экспертизу всех летательных аппаратов, разрабатываемых в российских конструкторских бюро, и дает окончательное заключение о возможности и безопасности первого полета. ЦАГИ принимает участие в формировании государственных программ развития авиационной техники, а также в создании норм летной годности и регламентирующих государственных документов.

Экспериментальная база института является уникальной, отвечает самым высоким международным требованиям и способна в наземных условиях моделировать полет при скоростях от 10 м/с до значений, соответствующих числам Маха, равным 25.

Прочностные испытания регионального самолета нового поколения Sukhoi Superjet 100 в зале статических испытаний ЦАГИ

Испытание модели ближне – среднемагистрального самолета МС-21 в дозвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ

В ЦАГИ создается научно-технический задел на перспективу авиационной отрасли, выполняется значительный объем исследований и разработок, в том числе:

- новые сверхкритические крылья и аэродинамические компоновки перспективных самолетов и вертолетов, методы вычислительной аэродинамики;
- повышение весового совершенства и увеличение ресурса за счет применения новых материалов и оптимизации конструктивно-силовых схем;
- исследования по интеграции элементов планера и воздухозаборных устройств;
- принципиальные схемы, структура и алгоритмы управления самолетов и вертолетов нового поколения;
- инновационные конструкционные материалы для перспективных летательных аппаратов;

- технологии компьютерного проектирования и производства элементов конструкции самолетов и вертолетов;
- обеспечение выполнения перспективных международных требований по шуму.

ЦАГИ всегда был и остается головной отечественной научной организацией, обеспечивающей формирование государственной политики в области авиации и создание передовой гражданской и военной авиационной техники, объектов ракетно-космической промышленности.

С 2014 года ЦАГИ, наряду с ЦИАМ, ГосНИИАС, СибНИА и ГкНИПАС, входит в состав Национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», выполняющего роль единого центра управления отечественной прикладной наукой в авиационной сфере для формирования опережающего научно-технического задела на основе принципов междисциплинарной конвергенции наук и межотраслевой интеграции технологий.

Испытание модели ближне - среднемагистрального самолета МС-21 в трансзвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ

Отработка систем управления гражданского самолета в дозвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ

**Направления деятельности**

- Аэродинамика самолетов, вертолетов, ракет и других летательных аппаратов
- Аэродинамика силовых установок летательных аппаратов
- Динамика полета и системы управления летательных аппаратов
- Анализ устойчивости и управляемости летательных аппаратов
- Разработка активных систем снижения нагрузок на конструкцию летательных аппаратов, повышение безопасности полета и улучшение информационного обеспечения пилота
- Разработка пилотажных стендов для отработки динамики полета, исследования взлетно-посадочных режимов и маневрирования самолетов и вертолетов
- Прочность авиационных конструкций и конструктивно-силовые схемы летательных аппаратов
- Усталость и живучесть конструкций, обеспечение ресурса и безопасной эксплуатации самолетов и вертолетов
- Статическая и тепловая прочность летательных аппаратов
- Аэроупругость летательных аппаратов и строительных сооружений
- Аэротермодинамика высокоскоростных летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники
- Физика плазмы и управление течением с помощью электрических разрядов
- Гидродинамика амфибийных летательных аппаратов, исследования процессов аварийного и штатного приводнения объектов авиационной техники

- Гидродинамика двусредных объектов морской техники
- Решение проблем высокоскоростного подводного движения
- Разработка методов и средств совершенствования акустических характеристик летательных аппаратов и технологий снижения уровней шума на местности, в кабинах и салонах
- Разработка аэродинамических схем высокоэффективных малошумных промышленных вентиляторов
- Управление научными проектами
- Системные исследования и концептуальное проектирование
- Исследования альтернативных источников энергии для самолетов и вертолетов
- Применение нанотехнологий в авиационно-космической технике
- Компьютерные технологии при проектировании и изготовлении аэродинамических моделей
- Проектирование экспериментальных установок для наземных испытаний авиационной, ракетной и космической техники
- Высокоточное производство на станках и обрабатывающих центрах с числовым программным управлением

*Научное издание*

**XII ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД**
**ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ**
**ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ**

**19-24 августа 2019 года**

**Уфа, Республика Башкортостан, Россия**

# АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

*Публикуется с представленных авторами оригиналов*

*Лицензия на издательскую деятельность*
*ЛР № 021319 от 05.01.99 г.*

Подписано в печать 26.07.2019 г. Формат 60x84/8.
Усл. печ. л. 20,47. Уч.-изд. л. 21,36.
Тираж 1500 экз. Изд. № 207. Заказ 238
Цена договорная.

*Редакционно-издательский центр*
*Башкирского государственного университета*
*450076, РБ, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32.*

Отпечатано в ООО «КОНСТАНТА».
308519, Белгородская область,
Белгородский р-н, п. Северный, ул. Березовая, 1/12