



2-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

МЕХАНИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ

17 декабря – 19 декабря 2013 года

Москва, Ленинградский проспект, 7

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МОСКВА
2013

**Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов
управления Российской академии наук**

**Научный совет Российской академии наук по механике конструкций
из композиционных материалов**

ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук

**ФГБУН Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук**

**ФГБУ ВПО Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)**

**Московский физико-технический институт
(Государственный университет)**

МЕХАНИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
2-й Всероссийской научной конференции**

МОСКВА
2013

«Механика наноструктурированных материалов и систем». Тезисы докладов 2-й Всероссийской научной конференции. **Москва, 17 декабря – 19 декабря 2013 г. – Москва, ИПРИМ РАН, 2013 – 154 с.**

В сборник материалов конференции включены тезисы докладов ученых и исследователей из институтов Российской академии наук, научных и образовательных учреждений России, Украины, Азербайджана и др. Представлены различные направления механики деформируемого твердого тела, механики жидкости, газа и плазмы, вычислительной механики и др.

Составители:

Карнет Ю.Н., Муковникова И.И., Левин Ю.К., Яновский Ю.Г.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Проблемы прочности наноструктурированных композитов, адаптивных материалов и конструкций	13
Применение уточненных стержневых моделей для описания распространения упругих волн в слоистых конструкциях	
Архипова Н.И., Ерофеев В.И.....	14
Устойчивость пластины с наноразмерным отверстием при учете полной системы поверхностных сил	
Бауэр С.В., Каштанова С.В., Морозов Н.Ф., Семенов Б.Н.	15
Баллистические свойства защитных конструкций экранного типа с сеточными элементами	
Безруков Л.Н., Мягков Н.Н., Шумихин Т.А.....	16
Задача об изнашивании упругой полуплоскости с изменяющейся по глубине износостойкостью	
Бобылёв А.А., Белашова И.С.....	17
Влияние степени дисперсности минерала шунгит на комплекс свойств эластомерных материалов на основе сополимера бутадиена и стирола	
Бойко О.В., Яновский Ю.Г., Корнев Ю.В., Чиркунова С.В.....	18
Задача устойчивости упругой пластины, ослабленной нановырезами	
Бочкарев А.О., Греков М.А., Морозов Н.Ф.....	19
Наномеханика явления усиления наполненных эластомеров	
Гамлицкий Ю.А.....	20
Расчётно-экспериментальный метод построения определяющих соотношений вязкоупругого типа для наполненных эластомеров	
Гамлицкий Ю.А.....	22
Влияния ионной имплантации на коррозионный износ	
Гиниятуллин Р.Р., Якупов Н.М.....	24
Особенности процесса горячего изостатического прессования изделий больших геометрических размеров	
Головешкин В.А., Бочков А.В., Козырев Ю.М., Пономарев А.В., Хомяков Е.И.....	25
Модель высокоскоростного взаимодействия периодической системы струн с массивной преградой	
Головешкин В.А., Мягков Н.Н.....	26
Упруго-пористое полупространство под действием осесимметричного нестационарного нормального перемещения его границы	
Данг Куанг Занг, Тарлаковский Д.В.....	27
Исследование процесса распространения трещины от поры в субмикронных и наноструктурных твердых сплавах с разной объемной долей кобальта	
Дворник М.И., Михайленко Е.А.....	29
Кинетика диффузионных пор в нанокристаллическом жаропрочном сплаве при термоциклировании	
Емалетдинов А.К., Галактионова А.В.....	30

Моделирование диффузионных процессов в нанокристаллическом двухфазном сплаве при термомеханической нагрузке Емалетдинов А.К., Галактионова А.В.....	31
Некоторые модельные задачи динамической устойчивости систем с эффектом памяти формы Жаворонок С.И.....	32
О различных вариантах расширенной теории оболочек и их приложениях к задачам стационарной динамики Жаворонок С. И.....	33
Влияние режима термомеханической обработки на изменение механических свойств и структуры в алюминиевом сплаве 1421 Землякова Н.В.....	34
Исследование микротвёрдости нанокompозита на основе карбида кремния, армированного углеродными нанотрубками, в широком диапазоне концентраций нанотрубок Иванов А.В., Ивлиева В.В., Касимовский А.А., Попова Н.А.....	35
О способе обработки сигналов виброиспытаний гасителей колебаний проводов ВЛ с использованием метода наименьших квадратов Козлов К.С., Данилин А.Н.....	36
Влияние малых добавок углеродных нанотрубок на свойства эластомерных материалов на основе сополимера бутадиена и стирола Корнев Ю.В., Яновский Ю.Г., Бойко О.В., Чиркунова С.В., Гусева М.А.....	37
Исследование теплового и термонапряженного состояния лопаток ГТД с керамическими покрытиями при ВЧ нагреве Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г.....	38
Конструкционный керамический материал в системе SiC-Al₂O₃ Лукин Е.С., Попова Н.А., Павлюкова Л.Т.....	39
Прочная и твердая прозрачная керамика из алюмомагнезиевой шпинели Лукин Е.С., Попова Н.А., Павлюкова Л.Т.....	41
Континуальные модели адгезионных взаимодействий деформируемых тел Лурье С.А.....	42
Нелинейные многоуровневые краевые задачи механики деформирования и разрушения композитов Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В.....	43
Моделирование прямого фазово-структурного превращения в рамках трехуровневой модели нелинейного деформирования сплава с памятью формы Мишустин И.В.....	44
Экспериментальное исследование реономных свойств сплавов с памятью формы Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л.....	45
Учет мгновенных неупругих деформаций при описании реономных свойств сплавов с памятью формы Мовчан А.А., Климов К.Ю.....	46

Задачи предельного деформирования для элементов из сплавов с памятью формы	
Мовчан А.А., Машихин А.Е., Саганов Е.Б.....	48
Углепластики на основе эпоксидных порошковых наноконпозиций	
Молчанов Е.С., Юдин В.Е., Кыдралиева К.А., Елоховский В.Ю., Ваганов Г.В., Иванькова Е.М., Бакулин В.Н.....	50
О фрагментации ударника при высокоскоростном пробитии тонкого экрана	
Мягков Н.Н., Силантьев М.В.....	51
Численно-экспериментальное исследование деформирования стентов при осевом сжатии	
Нуштаев Д.В., Жаворонок С.И., Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А.....	53
Об адгезии твердых тел	
Ромашин С.Н., Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С.....	54
Синтез графена, на основе метода Хаммерса	
Семенов П.Е., Гусева М.А.....	55
Силиконовые резины с повышенной биологической стойкостью	
Семенов Н.А., Юмашев О.Б., Зарайский Е.И., Яновский Ю. Г.....	56
Влияние “in situ” обработки на механические свойства спеченных композиционных материалов системы Al-Sn	
Скоренцев А.Л., Русин Н.М.....	57
Исследование локальных эффектов в распределении температурных напряжений на контактных границах слоистых сред	
Соляев Ю.О., Нгуен К., Харченко К.Д., Саганов Д.Б.....	58
Нанодисперсный минерал шунгит как новый упрочняющий наполнитель для эластомерных материалов на основе каучуков специального назначения	
Чиркунова С.В., Яновский Ю.Г., Корнев Ю.В., Бойко О.В.....	59
Моделирование демпфирующих свойств трехслойных пластин с композитными несущими слоями и легким наполнителем	
Шишкин В.М., Левашов А.П.....	60
Колебания составных ортотропных оболочек вращения с кольцевыми шпангоутами, частично заполненных жидкостью	
Шклярчук Ф.Н.....	61
Особенности элементов структуры в сверхпроводящем кабеле на основе сплава Nb-Ti	
Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Мальцев Ю.А.....	62
Исследование систем «подложка - покрытие»	
Якупов С.Н., Якупов Н.М.....	63
Секция 2. Аэро-, гидромеханика и реология структурно сложных сред	64
О движении частиц в химически активной среде	
Батищева Я.Г., Веденяпин В.В., Мелихов И.В.....	65
Математическое моделирование интерференции волновых полей вблизи частиц	
Бедарев И.А., Федоров А.В.....	66

Исследование волн цунами в лабораторной установке	
Бошенятов Б.В.....	67
Связь характеристик структуры поверхности гетерогенных систем с физико-механическими свойствами и скоростью перемещения в них наночастиц	
Валиев Х.Х., Снегирева Н.С., Науменко В.Ю.....	68
Моделирование аэроупругого взаимодействия лопаточного венца рабочего колеса компрессора авиационного двигателя	
Говоров А.А., Мартыросов М.И.....	69
Об эффективной вязкости разбавленных дисперсных сред	
Гуськов О.Б.....	70
К гидромеханике структурных сред в коллекторе с проницаемыми стенками	
Исмаилов Р.Ш., Гахраманов П.Ф., Исмаилова Ш.Г., Гулиев Э.Ф.....	71
Влияние магнитного поля на коагуляцию наноразмерных коллоидных частиц	
Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.....	72
Особенности массопереноса в пересыщенном растворе при его магнитной обработке	
Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.....	73
Объемная вязкость микропузырьковой газожидкостной среды	
Левин Ю.К., Попов В.В.....	74
Реология сланцев: транспорт газовой фазы в нанопорах керогена	
Саваторова В.Л., Талонов А.В., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б.....	75
Электрореологические свойства суспензий на основе наноразмерных частиц полиимидов	
Семенов Н.А., Сидорова Г.Я., Юмашев О.Б., Гусева М.А., Яновский Ю.Г.....	76
Экспериментальное исследование реологических свойств магнитоуправляемых сред в условиях циклических нагрузок и их кинематическое моделирование	
Шалашилин А.Д., Семенов Н.А., Яновский Ю.Г.....	78
Секция 3. Проблемы горения и детонации сложных сред	79
Разработка методик экспериментального определения параметров и характеристик бескомпрессорных ВРД ракетных ЛА	
Большаинов И.П., Захаров Н.Н., Садовин М.А., Прудников А.Г., Прядко Е.С.	80
Разработка системы сбора и обработки экспериментальных данных в гиперзвуковой импульсной трубе при исследовании задач внешней и внутренней аэрогазодинамики	
Большаинов И.П., Садовин М.А.....	81
Экспериментальное исследование однофазных, многофазных и огненных вихрей с целью интенсификации процессов гетерогенного горения	
Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.....	82

Процессы поджига и горения жидких углеводородных топлив с присадками наночастиц	
Великодный В.Ю., Дыренков А.В., Попов В.В., Яновский Ю.Г.....	83
Качественная теория движения и горения турбулентных струй	
Воротилин В.П., Яновский Ю.Г.....	84
Исследование методами математического моделирования влияния концентрации нейтральной компоненты горючих газовзвесей на структуру фронта пламени и его ускорение	
Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Яковенко И.С.....	85
Устойчивость дозвуковых микро – струй и их горение	
Козлов В.В., Грек Г.Р., Катарсонов М.М., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.....	86
Экспериментальное исследование вихревых структур в газовой струе при акустическом воздействии	
Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Моралев И.А.....	88
Исследование влияния термической неравновесности на конвективный и радиационный нагрев марсианского космического аппарата	
Левин В.А., Афонина Н.Е., Громов В.Г.....	89
Управление детонационным горением в сверхзвуковом потоке горючей газовой смеси в плоских каналах	
Левин В.А., Журавская Т.А.....	90
Моделирование пространственных структур детонации	
Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	91
Эксперимент и численное моделирование течений в аэродинамической установке нии механики мгу	
Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В., Хмелевский А.Н.....	92
Исследование волновых процессов в аэродинамической трубе ИПРИМ РАН в натурном и виртуальном эксперименте	
Левин В.А., Яновский Ю.Г., Марков В.В., Большианов И.П., Захаров Н.Н., Мануйлович И.С., Прудников А.Г.....	93
Исследование динамики возникновения и развития неустойчивостей фронта пламени при горении смесей водорода и углеводородов с воздухом	
Набоко И.М., Рубцов Н.М., Сеплярский Б.С., Черныш В.И., Цветков Г.И.....	94
Исследование процесса горения и ингибирования больших сферических газовых зарядов	
Петухов В.А., Набоко И.М., Азатян В.В., Гусев П.А., Солнцев О.И., Бублик Н.П., Гуткин Л.Д.....	96
Экспериментальное исследование физических механизмов вибрационного горения твердого биотоплива	
Полежаев Ю.В., Гешеле В.Д., Раскатов И.П., Стоник О.Г.....	97
Визуализация расчетов, полученных методом гидродинамики сглаженных частиц, в задачах горения	
Семянистый А.В.....	98

Способ построения явной разностной схемы повышенной точности для линейного дифференциального уравнения на основе метода наименьших квадратов для проведения расчетов с использованием гидродинамики сглаженных частиц в задачах горения	
Семянистый А.В., Яновский Ю.Г.....	99
Управление горением углеводородных топлив изменением пространственной конфигурации внешнего электрического поля	
Третьяков П.К., Тупикин А.В., Козулин В.С., Зудов В.Н., Казазаев А.В., Крайнев В.Л.....	100
Определение времен задержки воспламенения в смесях метан/воздух/частицы Fe	
Тропин Д.А., Федоров А.В.....	101
Структура ударных волн в гетерогенной среде с двумя давлениями	
Федоров А.В.....	102
Структура детонационной волны в метано-воздушной смеси	
Федоров А.В., Фомин П.А., Тропин Д.А.....	103
Влияние межфазного тепло- и массообмена на ударно-волновое инициирование кислородсодержащих пузырьков в жидком циклогексане	
Фомин П.А.....	104
Управление детонационными процессами в силаносодержащих газовых смесях путем добавления химически инертных микрочастиц	
Фомин П.А., Федоров А.В., Дж.-Р. Чен.....	105
Термодинамика и механизмы реакций горения сложно-композитных топлив с новыми углеродными добавками. квантово-механическое исследование	
Яновский Ю.Г., Никитина Е.А., Никитин С.М., Карнет Ю.Н.....	107
Секция 4. Электрофизические и теплофизические процессы и технологии	108
Экспериментальное исследование работы плазменного реактора для очистки органических отходов	
Великодный В.Ю., Дыренков А.В., Попов В.В., Сон Э.Е.....	109
Исследование взаимодействия турбулентного пограничного слоя с ударной волной в условиях интенсивного теплообмена	
Глушнева А.В., Савельев А.С., Сон Э.Е., Терешонок Д.В.....	110
Микроструктура течения, вызванного диэлектрическим барьерным разрядом в воздухе	
Голуб В.В., Савельев А.С., Сон Э.Е.....	111
Влияние реологии жидкостей на развитие неустойчивости Релея-Тейлора	
Долуденко А.Н., Сон Э.Е.....	112
Численное моделирование сверхзвукового течения за решеткой и в газодинамическом сопле	
Зибаров А.В., Сон К.Э.....	113

Сравнительный анализ экспериментального и теоретического и исследования закрученного метано-воздушного пламени Крикунова А.И., Савицкий Д.В., Сон Э.Е.....	114
Исследование устойчивости плоскопараллельного течения термовязкой жидкости Куликов Ю.М., Сон Э.Е.....	115
Исследование электрического разряда в двухфазных газо-жидкостных средах Панов В.А., Сон Э.Е.....	116
Термодинамическая интерпретация эффекта Ребиндера в теории адсорбционного слоя на твердой поверхности с учетом ее деформации Подгаецкий Э.М.....	117
О методе функций плотности вероятности для расчета турбулентного смещения и горения Сон Э.Е.....	118
Численное моделирование тепловых процессов в силовых трансформаторах Сон Э.Е., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Савицкий Д.В.....	120
Поверхностный тлеющий разряд как альтернатива ДБР для задач плазменной аэродинамики Терешонок Д.В.....	121
Применение плазмотрона для подогрева стали в промежуточном ковше при непрерывной разливке Юсупов Д.И., Тюфтяев А.С., Филиппов Г.А., Пак Ю.А.....	122
Секция 5. Вычислительные методы механики наноструктурированных и гетерогенных сред	123
Система уравнений для определения сил и моментов в элементах посадочного устройства космического аппарата и процедура их решения совместно с уравнениями движения Бакулин В.Н., Воронин В.В., Борzych С.В.....	124
Задачи оптимального проектирования структурно-неоднородных композиционных материалов и конструкций с требуемым комплексом свойств в вариационной постановке Бакулин В.Н., Гусев Е.Л.....	126
Критерий адаптации конечно-элементной сетки при монотонной сходимости Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В.....	127
Нейросетевая модель вязкоупругих сред в режиме кнечных деформаций Басистов Ю.А., Яновский Ю.Г.....	128
Параметрический метод асимптотического усреднения для нелинейных уравнений термоупругости с быстроосциллирующими коэффициентами Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.....	129
Метод мелкозернистого параллелизма в моделировании перколяционных структур Гергеа А.Н., Остапкевич М.Б.....	130

Экспериментально-теоретическая модель плазменного разложения цирконового концентрата	
Данилова О.Т.....	131
Исследование закономерностей влияния структуры углерод-углеродного материала на механические свойства	
Долгодворов А.В., Чекалкин А.А.....	132
Приложение нелокального преобразования д'Аламбера для получения точных решений стационарного двумерного уравнения Шредингера	
Кудрявцев А.Г.....	133
Моделирование эффективных свойств волокнистых композитов, армированных вискеризованными волокнами	
Минат М., Лурье С.А.....	134
Квантово-механическое исследование агрегации углеродно-силикатных наночастиц, усиливающих наполнителей полимерных композитов	
Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Никитин С.М., Карнет Ю.Н.....	135
Компьютерный подбор наполнителей эпоксидных клеев для создания композиций с улучшенными эксплуатационными свойствами	
Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Никитин С.М., Карнет Ю.Н.....	136
Метод численного моделирования тепломассопереноса в конических оболочках из углепластика	
Острик А.В., Бакулин В.Н.....	137
Нестандартные задачи механики деформируемого твердого тела и итерационный метод их решения	
Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В.....	139
О масштабозависимых моделях стержней, построенных с привлечением градиентных теорий упругости	
Попова Е.И., Лурье С.А.....	140
Регрессионно-тензорное моделирование оптимальных процессов многофакторных когнитивных систем	
Русанов В.А., Агафонов С.В., Данеев А.В., Лямин С.В.....	141
Метод многомасштабного усреднения для описания необратимых процессов в структурно неоднородных средах	
Саваторова В.Л., Талонов А.В.....	142
Гиперболические модели в механике гетерогенных сред. разработка, анализ и приложения	
Суров В.С., Березанский И.В., Степаненко Е.Н.....	143
Математическое моделирование деформирования проволочных конструкций спирального типа	
Тарасов С.С., Данилин А.Н.....	145
О построение аналитического корректирующего решения с согласованной кинематикой в задаче об изгибе ортотропной полосы со статическими условиями на продольных краях	
Харченко К.Д., Лурье С.А.....	146

Секция 6. Биомеханика	147
Нанобактерии: открытие, значение для теории эволюции, роль в медицине, ветеринарии и экологии	
Зарайский Е.И.....	148
Комплекс средств для улучшения механических параметров кожи на основе шунгит серебряного нано-композита и наноразмерного золота	
Огудина Г.Н., Зарайский Е.И.....	149
Метод повышения диагностической ценности серологической диагностики рака легкого	
Осьмак Г.Ж., Огудина Г.Н., Полтавцев Ан.М., Зарайский Е.И.....	150
Экспресс методы оценки нейротоксичности наночастиц и нанокомпозитов	
Осьмак Г.Ж., Полтавцев Ал.М., Полтавцев Ан.М., Зарайский Е.И.....	151
Изменение микрофлоры кишечника в результате старения и использования нанолекарств	
Паршиков И.А.....	152
Модели оценки острой токсичности наносоединений на основе определения солей тетразолия	
Полтавцев Ал.М.....	153
Одноразовый бокс для проведения тестов на биоцидное действие и биобезопасность наночастиц и нанокомпозитов	
Полтавцев Ал.М., Осьмак Г.Ж., Полтавцев Ан.М., Зарайский Е.И.....	154

Секция 1

Проблемы прочности наноструктурированных композитов, адаптивных материалов и конструкций

ПРИМЕНЕНИЕ УТОЧНЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Архипова Н.И., Ерофеев В.И.

ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

Наряду с инженерными (классическими) моделями в динамике стержней существуют, так называемые, уточненные или неклассические модели. Эти модели учитывают дополнительные факторы, влияющие на динамический процесс, или свободны от некоторых гипотез, принятых в инженерных теориях и ограничивающих область их применимости.

Классическую теорию Д. Бернулли, принятую при описании продольных колебаний стержня, обобщают модели Релея-Лява (учет кинетической энергии поперечных движений частиц стержня), Бишопа (учет еще и потенциальной энергии сдвиговых деформаций), Миндлина-Германа (свобода от гипотезы об одноосности деформированного состояния стержня).

Классическую теорию Я.Бернулли и Л.Эйлера, принятую при описании изгибных колебаний стержня, обобщают модели Релея (учет кинетической энергии инерции вращения элемента стержня при изгибе) и Тимошенко (учет еще и потенциальной энергии сдвиговых деформаций при изгибе).

Уточненные модели применяют, как правило, при описании высокочастотных волновых процессов, когда длина волны становится сравнимой с диаметром поперечного сечения стержня и инженерные модели принципиально неприменимы. Однако в упомянутом частотном диапазоне следует учитывать многомодовость волнового процесса и предпочтение, чаще всего, отдается не уточненным стержневым моделям, а моделям твердотельных многомодовых волноводов – упругий слой (задача Лэмба) и толстостенный цилиндр (задача Похгаммера-Кри).

В представляемой работе показано, что уточненные стержневые модели могут быть применены для описания динамических процессов в слоистых элементах конструкций. Рассуждения проводятся на примерах двухслойного стержня, совершающего продольные колебания и двухслойной, гибкой нерастяжимой струны, совершающей поперечные колебания. Задачи рассмотрены в упругой, вязко-упругой и нелинейно-упругой постановках.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИНЫ С НАНОРАЗМЕРНЫМ ОТВЕРСТИЕМ ПРИ УЧЕТЕ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ

Бауэр С.В., Каштанова С.В., Морозов Н.Ф., Семенов Б.Н.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Рассмотрено влияние поверхностного эффекта на устойчивость бесконечной упругой тонкой пластины с круговым наноразмерным отверстием, находящейся под действием одноосного растяжения. Решена задача устойчивости с учетом поверхностных напряжений, действующих по границе отверстия, а также с учетом дополнительного вклада поверхностных сил, действующих на плоскостях самой пластины. Проведен сравнительный анализ полученных решений друг с другом и с решением классической задачи Кирша. Изучено влияние поверхностных напряжений на концентрацию напряжений в области отверстия. В докладе будет рассказано о методике учета поверхностных напряжений для нанообъектов, продемонстрировано решение соответствующих задач теории упругости, а также решение связанной задачи о потере устойчивости.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКРАННОГО ТИПА С СЕТОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Безруков Л.Н.¹, Мягков Н.Н.², Шумихин Т.А.²

¹ФГУП ГОСНИИАС, г. Москва

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Была проведена серия из 12 баллистических экспериментов с целью выявить устойчивость к пробитию защитных конструкций экранного типа, где в качестве экранов использовались стальные сетки с различными параметрами. Скорость соударений лежала в диапазоне 2.66 – 3.44 км/с. В качестве ударников использовались шарики из алюминиевого сплава АД-1 диаметром 6.34 мм. Защитная конструкция включала 2 или 3 разнесённых сеточных экрана. Количество сложенных вместе одиночных сеток в каждом экране варьировалось от одного до пяти штук. Расстояния от первого экрана до защищаемой стенки (высота конструкции) варьировалась от 100 до 200 мм, а удельный вес всей конструкции (включая вес защищаемой стенки) от 10.82 до 15.04 кг/м². Отношение критического диаметра ударника (когда защищаемая стенка оказывается пробитой в условиях баллистического предела) к общему удельному весу конструкции было выбрано как мера эффективности защитной конструкции (факто эффективности).

Эксперименты показали, что взаимное расположение экранов конструкции не влияет на её эффективность, однако существенным оказывается количество одиночных сеток в экране и распределение массы между экранами. Для некоторых конструкций фактор эффективности оценен с хорошей достоверностью.

ЗАДАЧА ОБ ИЗНАШИВАНИИ УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПО ГЛУБИНЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ

Бобылёв А.А.¹, Белашова И.С.²

¹*ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ, г. Днепрпетровск, Украина*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

Увеличение срока службы инструментов и деталей машин, работающих в жестких условиях высоких контактных нагрузок, всё больше связывают с модифицированием их поверхности. Технологии поверхностного упрочнения позволяют получать модифицированные слои различного состава, с заданной структурой и новыми свойствами. В частности, после лазерного легирования поверхность материалов представляет собой структуру, дисперсионно-упрочненную наночастицами в результате конвективного механизма массопереноса. Поверхностная твердость после такой обработки может достигать 28000 МПа. Поэтому исследования кинетики изнашивания модифицированных поверхностей материалов с учётом особенностей их формирования и структурной неоднородности по глубине являются актуальными.

В настоящей работе рассмотрена задача об изнашивании абсолютно жестким индентором упругой полуплоскости с изменяющейся по глубине износостойкостью. Упругие характеристики материала полуплоскости считаются структурно нечувствительными и постоянными по глубине. При постановке задачи предполагается, что величина линейного износа мала и соизмерима с упругими перемещениями, а граничные условия можно отнести к недеформированной поверхности полуплоскости. Допускается изменение размеров площадки контакта при изнашивании. Кинетическое уравнение износа определяет зависимость интенсивности изнашивания от величины контактного давления и скорости скольжения индентора.

Для решения износоконтактной задачи использован вариационный подход. Получена формулировка задачи в виде квазивариационного неравенства эволюционного типа. Для дискретизации по времени кинетического уравнения износа использована явная схема аппроксимации. На каждом временном шаге для определения контактного давления требуется решить эллиптическое вариационное неравенство или эквивалентную ему экстремальную задачу. Дискретизация задач производилась методом граничных элементов. Использованы элементы с постоянным по длине распределением контактного давления. В результате дискретизации получена задача квадратичного программирования с ограничениями в виде неравенств. Для решения задачи квадратичного программирования разработан вариант метода сопряженных градиентов, учитывающий специфику ограничений задачи.

Получены численные решения ряда износоконтактных задач. Исследовано влияние характера изменения по глубине износостойкости на кинетику процесса износа упругой полуплоскости. Сформулированы рекомендации по выбору параметров вычислительного алгоритма – шага дискретизации по времени и количества граничных элементов на площадке контакта с индентором.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №13-01-00728).

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ МИНЕРАЛА ШУНГИТ НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА БУТАДИЕНА И СТИРОЛА

Бойко О.В., Яновский Ю.Г., Корнев Ю.В., Чиркунова С.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Важным эффектом упрочнения (усиления) ряда эластомерных материалов является их наполнение - введение тонкодисперсных порошков. В настоящее время широко распространёнными усиливающими наполнителями резин являются различные марки технического углерода (ТУ), коллоидная кремнекислота (аэросил, БС) и другие тонкодисперсные порошки. В ИПРИМ РАН в качестве перспективного наполнителя эластомеров исследуется возможность использования нанодисперсного порошка природного минерала шунгит (НШП). Он легко вводится в каучук в процессе изготовления эластомерных материалов и изделий, является «малопылящим», не токсичным и отличается экологической безопасностью. Производимый в настоящее время в промышленных масштабах микроразмерный порошок шунгита (МШП) в силу достаточно крупного размера частиц не является усиливающим (упрочняющим) наполнителем. Актуальным является разработка способа его обработки для придания усиливающей способности и возможности использования его в качестве базового наполнителя эластомеров с целью полной/частичной замены применяемых в промышленности упрочняющих наполнителей. Основной целью работы является создание эластомерных композитов с комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик, содержащих в качестве основного усиливающего наполнителя наноразмерный минерал шунгит.

При введении нанодисперсного порошка шунгита в эластомерные материалы на основе сополимера бутадиена и стирола (каучука СКС-30АРК) наблюдается существенное (до 3х раз) увеличение прочности и напряжений при удлинении вулканизатов. Показано, что применение измельчённого до наноразмерного уровня дисперсности шунгита в качестве основного наполнителя для эластомеров даёт возможность получать эластомерные материалы, которые по упруго-прочностным свойствам сопоставимы с эластомерными композиционными материалами, наполненными техническим углеродом (серии N800 - N600). Установлено, что твёрдость резин с НШП по Шору А сопоставима с резинами с ТУ N660, БС-120 и МШП (при наполнении 65 м.ч.), при этом резины с НШП обладают большей эластичностью. Также резины, наполненные НШП, обладают заметно большей износостойкостью, в сравнении с резинами, наполненными ТУ N660, БС-120 и МШП. Отмечается большая усталостная выносливость эластомерных материалов наполненных НШП в сравнении с МШП.

Таким образом, показано, что нанодисперсный минерал шунгит в составе эластомерных композиций проявляет себя как упрочняющий наполнитель, также повышающий износостойкость и усталостную выносливость эластомерных композитов на основе каучука СКС-30АРК.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-01-00932).

ЗАДАЧА УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ НАНОВЫРЕЗАМИ

Бочкарев А.О., Греков М.А., Морозов Н.Ф.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Особенностью наноматериалов и наноструктур является наличие поверхностного эффекта, вызванного действием поверхностных напряжений – аналогом известного в гидромеханике поверхностного натяжения. Этот эффект проявляется в зависимости механических свойств нанообъекта от его размера. В данной работе на примере бесконечной пластины с круговым наноотверстием исследуется проблема влияния поверхностных напряжений на локальную потерю устойчивости пластины при растяжении.

В основе метода решения рассматриваемой задачи лежит разработанный ранее подход при решении задач о локальном выпучивании тонкого одноосно растянутого упругого листа с макро отверстиями различной формы [1]. Критическая (эйлерова) нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости, ищется методом Ритца в рамках линеаризованной системы уравнений Кармана на основе принципа виртуальных перемещений как наименьшая положительная нагрузка, доставляющая минимум потенциальной энергии деформации пластины. Для его применения, во-первых, находится обобщенное плоское напряженное состояние пластины с нановырезом при учете поверхностных напряжений [2]. При выводе аналитических зависимостей для напряжений в этой плоской задаче используются линеаризованные соотношения поверхностной упругости Гертца-Мердока, комплексные потенциалы Гурса-Колосова и обобщенный закон Юнга-Лапласа. Во-вторых, прогиб пластины представляется двойным рядом, удовлетворяющим условию затухания на бесконечности, и обеспечивающим свободу перемещений кромок отверстия.

Численные расчеты проведены для алюминиевой пластины. Рассмотрены два варианта упругих свойств поверхности выреза, полученные путем компьютерного моделирования Миллером и Шеной. Построены зоны сжимающих окружных напряжений, возникающих у кромок кругового выреза при действии растягивающей нагрузки при значениях радиуса выреза $R = 1, 2, 4$ нм. Показано, что учет поверхностных напряжений в обоих случаях снижает значение критической нагрузки, которая имеет тенденцию уменьшаться при уменьшении радиуса выреза в нанометровом диапазоне изменения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (11-01-00230, 12-01-00815)
и СПбГУ (НИР 9.37.129.2011)*

Литература:

1. Бочкарев А.О., Даль Ю.М. Локальная устойчивость упругих пластин с вырезами // Докл. АН СССР. – 1989. – Т.308. – №2. – С.312-315.
2. Grekov M.A., Yazovskaya A.A. Surface stress in an elastic plane with a nearly circular hole // Surface Effects in Solid Mechanics. Advanced Structured Materials. – Berlin: Springer. – 2013. – Vol.30. – P.81-94.

НАНОМЕХАНИКА ЯВЛЕНИЯ УСИЛЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Гамлицкий Ю.А.

ООО «Научно-технический центр «НИИШП», г. Москва

Предложена модель явления усиления, в основе которой лежит представление о наличии на поверхности частиц активного наполнителя тонкого слоя каучуковой матрицы, находящейся в псевдостеклообразном состоянии, которое по мере удаления от поверхности наполнителя переходит в высокоэластическое состояние [1]. При деформировании композита наиболее натянутые макромолекулы не рвутся, как в сетке химических узлов ненаполненной резины, а вытягиваются из псевдостеклообразного слоя по механизму, близкому к явлению вынужденной эластичности (хладотекучести). На основе модели получают естественное объяснение все эффекты, характеризующие явление усиления.

В настоящее время существует достаточно большое число исследований в этой области. К ним можно отнести работы Патрикеева Г.А., Александрова А.П. и Лазуркина А.С., Mullins L., Липатова Ю.С., G. Kraus, A.R. Payne, J.B. Donnet, A. Medalia, Печковской К.А., Лыкина А.С., Лазоренко М.В., Мошева В.В., Ляпиной Л.А., Яновского Ю.Г., Згаевского В.Э., Свисткова А.Л., Никитина Ю.Н., Раздьяконовой Г.И., Meng-Jiao Wang, Бухиной М.Ф., Dannenberg E.M., и ряда других. Однако до настоящего времени не существовало единой внутренне непротиворечивой модели и теории явления усиления.

Основная гипотеза, предложенная нами [2, 3], заключается в том, что при деформировании резины наиболее натянутые цепи не рвутся, как в случае сетки химических узлов, а переходят из псевдостеклообразного состояния пограничного слоя в высокоэластическое по механизму, аналогичному для явления вынужденной эластичности (хладотекучести). Это обеспечивает почти равномерное натяжение всех активных цепей сетки, причём натяжение цепей близко к их прочности ($\sim 7 \cdot 10^{-9}$ н). Тем самым повышается предельная нагрузка, которую может выдержать ансамбль цепей сетки. Расчёт прочности ансамбля цепей, имеющих разные функции распределения по натяжениям, приведён в работе [3]. Показано, что при реальных параметрах вулканизационной сетки максимальная условная прочность может достичь 45 МПа.

Процесс перехода части псевдостеклообразного слоя в высокоэластическое состояние при удалении от поверхности частицы активного наполнителя не является релаксационным в том смысле, что при снятии нагрузки «вытянутые» из псевдостеклообразного слоя макромолекулы не возвращаются обратно (как и в случае вынужденной эластичности). Переход в исходное состояние возможен только при повышении температуры, что подтверждается экспериментально. Это лежит в основе объяснения эффекта Патрикеева – Маллинза [4]. Остальным эффектам также даётся объяснение.

Литература:

1. Meng-Jiao Wang. Effect of Polymer-Filler and Filler-Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates. Rubber Chem. Technol., Rubber Reviews, 1998, v.71, №3, p.520-589.
2. Гамлицкий Ю.А., Басс Ю.П. К описанию явления усиления наполненных эластомеров. – Инженерно-физический журнал, 2003, т. 76, № 5, с. 101-105
3. Гамлицкий Ю.А., Швачич М.В. Прочность резины. Модель и расчет. Высокомолекулярные соединения, Серия А, 2005, т. 47, № 4, с. 660-668

4. Патрикеев Г.А. В кн.: Общая химическая технология. Т. 2. Под ред. С.И. Вольфовича. Государственное научно-техническое издательство химической литературы. – М. – Л., 1946 г., с. 407-409.

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ ВЯЗКОУПРУГОГО ТИПА ДЛЯ НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Гамлицкий Ю.А.

ООО «Научно-технический центр «НИИШП», г. Москва

Для расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) в резиновых изделиях часто пренебрегают вязкостью и используют определяющие соотношения в виде упругих потенциалов. Все такие определяющие соотношения недостаточно точно описывают связь между напряжениями и деформациями для резин, наполненных активным наполнителем в произвольном сложном однородном НДС [1]. Основная причина неточности в том, что наполненные резины имеют в области малых и средних деформаций ярко выраженную нелинейность, проявляющуюся в эффекте Пейна [2, 3]. В работе [1] предложен расчётно-экспериментальный метод построения упругих потенциалов для наполненных резин, основывающийся на особенностях их деформирования в области малых и средних деформаций, т.е. в той области, где, как правило, «живёт» любое РТИ и, в том числе, пневматическая шина. Константы потенциалов определяются на основе экспериментов, проведённых в сложных НДС, характеризующихся разными соотношениями главных деформаций. Для проведения таких экспериментов создано приспособление, которое устанавливается на стандартные разрывные машины.

Следующим шагом является построение определяющих соотношений с учётом вязкоупругих эффектов. В общем случае нагружения вязкоупругого тела главные направления по напряжениям и деформациям не совпадают. Для вязкоупругого тела определяющие соотношения записаны в напряжениях, а не в потенциалах из-за наличия диссипации энергии в процессе релаксации [4]. Процесс релаксации описывается моделью линейного вязкоупругого тела, предложенной Френкелем и Образцовым [5] и позже Зенером [6]. Однако можно использовать и другие, нелинейные, законы релаксации.

Исходное состояние задается величинами главных деформаций (относительных удлинений) $\epsilon_1^{(0)}, \epsilon_2^{(0)}, \epsilon_3^{(0)}$. Далее задается малое изменение деформированного состояния материала, осуществляемое на каждом шаге со своей скоростью. Это изменение представляется приращениями главных деформаций $\Delta\epsilon_1, \Delta\epsilon_2, \Delta\epsilon_3$ и поворотами главных осей $\Delta\gamma_{12}, \Delta\gamma_{13}, \Delta\gamma_{23}$. Вязкоупругое поведение резины описывается семью константами, которые подбираются минимизацией функционала отклонений теории от эксперимента. Три из них относятся к решению упругой задачи и четыре описывают релаксационные процессы. Результаты решения упругой задачи показали, что предложенная методология и виды упругих потенциалов наилучшим образом из известных в литературе описывают произвольное сложное однородное НДС наполненных резин. Полученные определяющие соотношения предназначены для использования в пакетах программ по расчёту НДС резинотехнических изделий и, в особенности, пневматических шин, с использованием метода конечных элементов.

Литература:

1. Гамлицкий Ю.А., Мудрук В.И., Швачич М.В. Упругий потенциал наполненных резин. Каучук и резина, 2002, № 3, с. 29-39
2. Усиление эластомеров. Сб. статей под ред. Дж. Крауса. - М., Химия, 1968 - 484 с.

3. Meng-Jiao Wang. Effect of Polymer-Filler and Filler-Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates. Rubber Chem. Technol., Rubber Reviews, 1998, v.71, №3, p. 520-589.
4. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. – ИМСС УрО РАН, 2003 г., 412 с.
5. Френкель Я.И., Образцов Ю.Н. ЖЭТФ, 1939, т. 9, с. 1081
6. Zener C. Elasticity and Anelasticity of Metals. Chicago, University Press, 1947

ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС

Гиниятуллин Р.Р., Якупов Н.М.

*ФГБУН Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН,
г. Казань*

Структура материала элементов конструкции во многом определяют их свойства. Поверхностная модификация элементов конструкций позволяет решать, в частности, проблемы долговечности и безопасности конструкций. Большой интерес представляет метод ионной имплантации, позволяющий внедрить в поверхностные слои металла дозированное количество ионов практически любых элементов – модификация поверхности на нано глубину.

Нами были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния ионной имплантации образцов на процесс коррозионного износа, используя для анализа полученных данных двумерный экспериментально - теоретический метод, разработанный в лаборатории НМО ИММ КазНЦ РАН.

Были проведены испытания на коррозионный износ трех пар металлических образцов из листовой стали марки Сталь 3 толщиной $t = 0.5$ мм, поверхности которых были подвергнуты импульсной ионной имплантации на глубину 70 нм атомами углерода C (образцы подготовлены в КФТИ КазНЦ РАН). Образцы выдерживались в растворе 10% соляной кислоты. В каждой группе образцов имелся «чистый» образец (поверхность не подвергалась ионной обработке), которые находились рядом со своей парой и в одинаковых условиях. Образцы находились в агрессивной среде разное время: группа №1 – 2 суток, группа №2 – 3 суток, группа №3 – 4 суток. На рис.1 представлены изображения поверхностей образцов групп №1 после выдерживания их в агрессивной среде, увеличенные в 40 раз, при этом слева (а) образцы без имплантации, справа (б) – с имплантацией. Из рис.1 видно, что поверхности не имплантированных образцов имеют более глубокие коррозионные углубления с большими размерами в плане. На рис.2 приведены кривые деформирования «прогиб H - давление P » для имплантированных образцов. Как видно из рис.2 с увеличением продолжительности выдерживания в агрессивной среде степень коррозионного износа увеличивается. Поверхностная обработка образца ионной имплантацией способствует снижению коррозионного износа, при этом с увеличением времени выдерживания в агрессивной среде эффект падает.

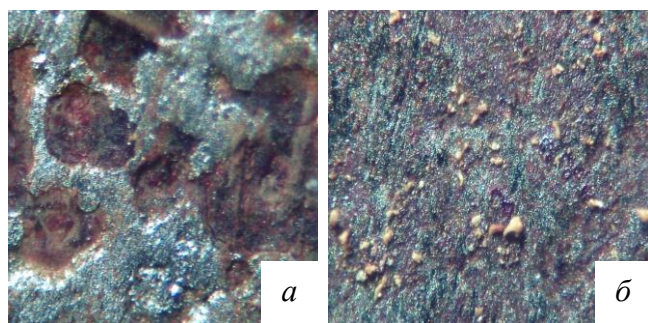


Рис.1 – Образцы 1-ой группы:

а - не имплантированные, б - имплантированные

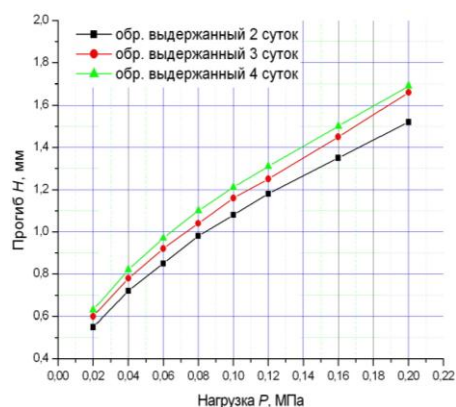


Рис.2 – Зависимость «Р-Н»

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований
ОЭММПУ РАН №12.*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ БОЛЬШИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Головешкин В.А.^{1,2}, Бочков А.В.¹, Козырев Ю.М.¹, Пономарев А.В.¹, Хомяков Е.И.³

¹*Московский государственный университет приборостроения и информатики,
г. Москва*

²*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

³*Лаборатория новых технологий, г. Москва*

Исследуются особенности процесса горячего изостатического прессования (ГИП) порошковых материалов для тел больших геометрических размеров. Для описания поведения порошкового материала принята модель Грина, для материала капсулы – модель идеальной пластичности. Для порошковых материалов коэффициент теплопроводности сильно зависит от относительной плотности. Предел текучести существенно уменьшается с ростом температуры. Для тел больших геометрических размеров в процессе ГИП имеет место неоднородное по объему, нестационарное температурное поле. Показано, что на начальном этапе процесса деформируется только слой порошкового материала в окрестности границ. Это приводит к существенным изменениям в конечной форме изделия, по сравнению с процессом в условиях однородного по объему температурного поля.

Второй момент, который следует учитывать при моделировании поведения в процессе ГИП тел больших геометрических размеров – это невозможность обеспечить равномерную начальную плотность порошка по объему. В работе анализируется влияние неоднородной по объему начальной плотности на конечную форму изделия.

Результаты сравниваются с экспериментальными данными.

МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТРУН С МАССИВНОЙ ПРЕГРАДОЙ

Головешкин В.А.^{1,2}, Мягков Н.Н.²

¹*Московский государственный университет приборостроения и информатики,
г. Москва*

²*ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва*

Предложена упругопластическая модель исследования напряженно-деформированного состояния, возникающего при высокоскоростном внедрении периодической системы струн в массивную преграду. Относительно свойств материалов принята модель идеальной пластичности и условие несжимаемости. В рамках предложенной модели описание поведения системы сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, для которой получено аналитическое решение. На основании полученного решения анализируется напряженно-деформированное состояние, возникающее в системе, на каждом этапе процесса взаимодействия. Модель позволяет оценить размеры, скорость и энергию фрагментов, выбиваемых из преграды. Полученные результаты сравниваются с результатами известных экспериментов по взаимодействию алюминиевого ударника с сеточным экраном.

УПРУГО-ПОРИСТОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЕГО ГРАНИЦЫ

Данг Куанг Занг, Тарлаковский Д.В.

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
г. Москва*

Рассматривается задача о распространении осесимметричных нестационарных возмущений в полупространстве $z \geq 0$ ($Oxyz$ – прямоугольная декартова система координат), занятом упруго-пористой средой. Её движение описывается безразмерными уравнениями модели Био [1] относительно скалярных потенциалов φ_1, φ_2 и ненулевой компоненты ψ векторного потенциала перемещений в скелете и в жидкости:

$$\Delta \varphi_j = \gamma_j^2 \ddot{\varphi}_j, \Delta \psi - \frac{\psi}{r^2} = \gamma_3^2 \ddot{\psi}, \quad \gamma_j = c_1/c_j \quad (j=1,2),$$

где c_1 и c_3 – скорости распространения волн растяжения-сжатия и сдвига в скелете; c_2 – скорость распространения волн в жидкости; точками обозначено дифференцирование по времени τ ; r – радиус цилиндрической системы координат.

При этом касательные u и U , а также нормальные w и W перемещения соответственно в скелете и жидкости связаны с потенциалами как:

$$u = \frac{\partial(\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial(\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\psi)}{\partial r},$$
$$U = \frac{\partial(\beta_1 \varphi_1 + \beta_2 \varphi_2)}{\partial r} - \beta_3 \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad W = \beta_1 \frac{\partial(\beta_1 \varphi_1 + \beta_2 \varphi_2)}{\partial z} + \frac{\beta_3}{r} \frac{\partial(r\psi)}{\partial r},$$

где β_k ($k=1,2,3$) – физические параметры, характеризующие пористость среды.

Физические компоненты тензора напряжений в скелете $\sigma_{\alpha\beta}(\alpha, \beta = r, z)$ и давление σ в порах связаны с перемещениями известными соотношениями [1].

Предполагается, что на плоскости $z=0$ заданы граничные условия, соответствующие одной из поверхностных функций влияния ($\delta(x, y, \tau)$ – дельта-функция Дирака):

$$w|_{z=0} = \delta(x, y, \tau), \quad W|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{rz}|_{z=0} = 0.$$

На бесконечности возмущения отсутствуют, а начальные условия нулевые.

Для решения указанной начально-краевой задачи применяются преобразования Лапласа по времени и Ханкеля по радиусу r .

Построены изображения всех компонентов напряженно-деформированного состояния. Их оригиналы находятся в явном виде с использованием таблиц обращения преобразований Лапласа и Ханкеля, а также с помощью алгоритма совместного обращения этих преобразований, основанном на аналитическом представлении изображений [2]. Приводятся примеры расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 12-08-00934).

Литература:

1. Наримов Ш.Н. Волновые процессы в насыщенных пористых средах. – Ташкент: «Мехнат», 1988. – 304 с.

2. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. – М.: Физматлит, 2004. – 467 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ОТ ПОРЫ В СУБМИКРОННЫХ И НАНОСТРУКТУРНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ С РАЗНОЙ ОБЪЕМНОЙ ДОЛЕЙ КОБАЛЬТА

Дворник М.И., Михайленко Е.А.

ФГБУН Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск

Область применения твердого сплава (ТС) определяется его прочностью. Для определения зависимости прочности от микроструктурных параметров в данной работе использованы модельные микроструктуры, соответствующие наноструктурным (размер зерна 200 нм) и субмикронным (размер зерна 1 мкм) реальным твердым сплавам ВК2, ВК4, ВК8 и ВК16. Так как средний диаметр зерна определяет максимальный допустимый размер дефекта, в данной работе изучено влияние одновременного уменьшения диаметра зерна и размера поры на прочность сплавов с одинаковым объемным содержанием Со фазы. Проведено моделирование распространения трещины от исходной центральной поры под действием растягивающей нагрузки (граничное условие Неймана (1 ГПа), приложенное к верхней границе микроструктур), получены распределения напряжений и смещений у кончика растущей трещины и рассчитаны скорости высвобождения энергии при продвижении трещины через карбидные зерна и кобальтовые участки.

По литературным данным построена зависимость критической скорости высвобождения энергии от доли кобальта в сплаве и приведена методика определения критической скорости высвобождения энергии для кобальтовой фазы. На основе этих данных рассчитаны напряжения, необходимые для продвижения трещины через карбидные зерна и участки кобальтовой фазы для субмикронных и наноструктурных твердых сплавов с разной объемной долей кобальта. Было определено, что напряжения, необходимые для разрушения карбидной фазы в субмикронных сплавах ниже, чем аналогичные напряжения в наноструктурных ТС.

Было определено, что скорость высвобождения энергии при продвижении трещины через карбидные зерна растет, а при прохождении трещины через кобальтовую прослойку – снижается. Для всех исследованных микроструктур напряжения, необходимые на прохождение трещины достигают максимума в кобальтовой прослойке, этот максимум соответствует прочности твердого сплава. В работе показано, что минимальная интенсивность напряжения растет с увеличением доли кобальтовой фазы в ТС с 2 до 16%, но предел прочности сплавов увеличивается за счет увеличения вязкости кобальта. Предел прочности наноструктурных сплавов выше предела прочности субмикронных сплавов, благодаря уменьшению концентрации напряжений из-за меньшего размера пор и зерен.

КИНЕТИКА ДИФфуЗИОННЫХ ПОР В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Емалетдинов А.К., Галактионова А.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Современные никелевые жаропрочные сплавы являются многокомпонентными двухфазными наноструктурными композиционными материалами. Концентрация вакансий меняется в широких пределах в течение рабочего цикла двигателя, и после его остановки избыточная концентрация может приводить к зарождению пор. Избыточная концентрация вакансий определяется рабочей температурой, напряженным состоянием сплава, состоянием границ зерен и др. Периодические процессы зарождения и стекания избыточной концентрации вакансий будут определять кинетику зарождения и роста пор. Рассмотрена модель диффузионного зарождения и роста поры в никелевом жаропрочном сплаве при циклическом термомеханическом нагружении с учетом влияния температуры, термоупругих напряжений и упругих модулей сплава на энергию образования вакансий, на коэффициент диффузии и потоки вакансий. Рассмотрено изменение критического размера образования поры под действием перечисленных факторов. Выполнена термодинамическая оценка условий образования поры критического размера с учетом этих изменений. Проведен анализ критического размера пор с учетом влияния упругой энергии межфазной границы, дислокаций несоответствия, концентрации напряжений в никеле, температурных напряжений циклических напряжений. Показано, что критический размер поры существенно уменьшается при учете перечисленных выше энергетических воздействий. Выполнены численные расчеты критического размера поры при действии различных факторов. Рассмотрена задача кинетики вакансий при циклическом термомеханическом нагружении с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии вакансий и упругих модулей сплава. В процессе циклической термомеханической нагрузки возникает избыточная неоднородная неравновесная концентрация вакансий, определяемая тепловыми, силовыми нагрузками, дислокационной структурой и диффузионными процессами потоков химических компонентов сплава, как в границах, так и в зернах интерметаллида, так и в никелевых прослойках. Проведены численные расчеты неоднородной концентрации вакансий в зернах интерметаллидов и никелевой прослойке. Рассмотрено нестационарное уравнение для химического потенциала и концентрации вакансий. Потоки неравновесной концентрации вакансий приводят к росту пор. Выполнены численные расчеты кинетики избыточной концентрации вакансий и потоков вакансий на поверхность поры с учетом при действии различных стоков и критического размера поры под действием термомеханических нагружений. Рассмотрена кинетика роста поры при поглощении избыточной неравновесной концентрации вакансий с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии вакансий и упругих модулей сплава. Записано уравнение динамики диффузионного роста поры под действием циклических термомеханических нагружений. Рассмотрено влияние зернограницной диффузии и поглощения дислокационной сетки на скорость роста поры, проведены численные расчеты.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ДВУХФАЗНОМ СПЛАВЕ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Емалетдинов А.К., Галактионова А.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Эволюция вакансионной системы и зарождение пор под действием циклической термомеханической нагрузки определяют долговечность нанокристаллических двухфазных сплавов, например жаропрочных сплавов, представляющих собой композиционные материалы, состоящие из кубических зерен размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками толщиной до 0,05 мкм. Рассмотрена задача кинетики вакансий при термомеханическом нагружении, включающем циклические напряжения растяжения, температурные напряжения и нагрев до высоких температур. В процессе нагружения возникает избыточная неоднородная неравновесная концентрация вакансий. В условиях непрерывного изменения температуры развиваются напряжения, возникающие вследствие разницы коэффициентов термического расширения фаз. Кинетика вакансий определяется диффузионным уравнением с источником вакансий по термоактивационному механизму с учетом диффузионных и термических напряжений, а также концентрации напряжений возле включений. Парциальные коэффициенты диффузии компонентов различны, что приводит к возникновению потоков вакансий в зернах и прослойках. Потоки вакансий возникают под влиянием неоднородных рабочих напряжений и температур сплава. Рассмотрены соотношения для парциального коэффициента диффузии компонентов. Записаны система уравнений для химического потенциала неравновесных вакансий в зернах и прослойке с учетом концентрации напряжений, а также граничные условия. Проанализировано характерное время жизни вакансий при циклическом термомеханическом нагружении. Сделаны оценки для времени жизни в зависимости от плотности дислокаций, пор, размера зерен. Проведены численные расчеты неоднородной концентрации вакансий в зернах интерметаллидов и никелевой прослойке при действии термомеханической нагрузки и различных значениях параметров. Рассмотрено влияние концентрационных и диффузионных напряжений при циклической термомеханической нагрузке на энергию образования вакансий и скорость их зарождения. Величина концентрационных напряжений зависит от размерного несоответствия атомов и модулей сжимаемости компонентов. Диффузионные напряжения возникают вследствие неравных встречных потоков атомов компонентов. Сделаны оценки возникающих дополнительных потоков вакансий, определяемых уменьшением энергии зарождения благодаря уменьшению модулей упругости и межатомной энергии связи при высоких температурных полях, собственной энергии дислокаций, границ зерен и концентрации напряжений. Рассмотрено уравнение для химического потенциала вакансий с учетом перечисленных выше параметров. Сделаны оценки скорости возрастания диффузионных потоков. Рассмотрены распределение и оценки циклических термоупругих напряжений в зерне и прослойке и связанные с этим дополнительные потоки вакансий.

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Жаворонок С.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Сплавы с памятью формы демонстрируют весьма сложный характер потери статической устойчивости выполненными из них тонкостенными элементами. Показано, что потеря устойчивости СПФ порождается непосредственно фазово-структурным переходом [1,2], что делает невозможным оценку критических нагрузок по наименьшему модулю упругости, соответствующему мартенситному состоянию материала. Динамическое поведение СПФ также чрезвычайно сложно и на текущий момент мало исследовано. Существует ограниченное количество работ, опубликованных в последние 10 лет и посвященных, в основном, динамике простейших осцилляторов с конечным числом степеней свободы. При этом в основу исследований положены простейшие модели СПФ, не учитывающие большинства особенностей их термомеханического поведения [3]. Тем не менее, показано, в частности, что сверхупругий осциллятор из СПФ склонен к переходу от гармонических колебаний к хаотическим [3]. Перспектива применения СПФ в качестве различных виброгасителей, обусловленная высокими демпфирующими характеристиками данных материалов, требует, помимо характера колебаний системы, исследования условий динамической потери устойчивости. С другой стороны, динамический критерий устойчивости необходим во многих задачах о статической устойчивости систем (при следящих нагрузках и т. п.).

Рассматриваются модельные системы с конечным числом степеней свободы, содержащие элементы с памятью формы: элементарный осциллятор и стойка с шарниром, выполненным из СПФ. Исследуется, в частности, поведение системы при учете реономных свойств сплава [4]. В качестве обобщенных координат системы вводятся обобщенные перемещения, порождаемые фазово-структурными деформациями. Так как полные и фазово-структурные деформации связаны неинтегрируемыми в общем случае уравнениями с разрывными свободными членами, предложен подход, традиционный для аналитической механики неголономных систем с импульсивными связями, основанный на введении в рассмотрение квазикоординат. Получены уравнения движения систем, исследование которых основывается на асимптотическом методе усреднения. Приводятся некоторые оценки устойчивости, сопоставляемые с численными решениями в точной постановке задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00446).

Литература:

1. Мовчан А.А., Сильченко Л. Г. Анализ устойчивости при прямом термоупругом превращении под действием сжимающих напряжений // Изв. РАН. МТТ. – 2004. – №2. – С.132-144.
2. Мовчан А.А., Сильченко Л.Г. Аналитическое решение связанной задачи об устойчивости пластины из сплава с памятью формы при обратном мартенситном превращении // Изв. РАН. МТТ. – 2004. – №5. – С.164-178.
3. Rega G. and al. Analysis of chaotic non-isothermal solutions of thermomechanical shape memory oscillators // Eur. Phys. J. Spec. Topics. – 2013. – Vol.222. – P.1637-1647.
4. Мовчан А.А., Климов К.Ю. Моделирование реономных свойств сплавов с памятью формы // Мех. композ. матер. и констр. – 2011. – Т.17. – №2. – С.255-267.

О РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ РАСШИРЕННОЙ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК И ИХ ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ СТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ

Жаворонок С.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Рассматриваются различные варианты построения расширенной трехмерной теории N -го порядка анизотропных оболочек на основе вариационного подхода [1]. Оболочка произвольной толщины приближенно представляется механической системой с конечным числом степеней свободы (переменных поля), определенных на гладкой реперной поверхности, и поверхностной плотностью функционала Лагранжа. В качестве переменных поля используются коэффициенты биортогональных разложений компонентов вектора перемещения, заданного в базисе, нормально связанном с реперной поверхностью. Уравнения движения оболочки имеют вид уравнений Лагранжа второго рода, инвариантных относительно выбора биортогональной системы функций разложения. Начально-краевые задачи, получаемые при удержании двух первых членов разложений, соответствуют сдвиговым моделям оболочек; при сохранении большего числа степеней свободы модель способна описывать трехмерное напряженное состояние в областях неприводимости.

Одним из основных затруднений при решении проблемы редукции трехмерной задачи является удовлетворение краевым условиям на лицевых поверхностях оболочки. В работе И.Н.Векуа [2] сформулирована расширенная трехмерная теория, позволяющая удовлетворить силовым краевым условиям на лицевых поверхностях за счет введения дополнительных степеней свободы – остаточных членов разложения компонентов вектора перемещения по полиномам Лежандра. Данный вариант теории позволяет, в частности, правильно вычислить цилиндрическую жесткость, как показано в [3], однако в общем случае структура уравнений расширенной теории N -го порядка весьма сложна.

В рамках вариационного подхода [1] предлагается обеспечить удовлетворение краевым условиям на лицевых поверхностях оболочки методами аналитической механики континуальных систем с дополнительными связями. Получены уравнения Лагранжа второго рода относительно новой системы обобщенных усилий, приведено толкование физического смысла дополнительных степеней свободы и соответствующих им обобщенных сил. Показано, что предложенный подход позволяет получить систему уравнений движения, аналогичную приведенной в работах [1,2] при видоизменении определяющих соотношений. На основе полученной новой формулировки начально-краевой задачи расширенной теории оболочек N -го порядка построены решения ряда задач о распространении нормальных волн в плоском слое и пустотелом цилиндре. Проведен анализ соответствия приближенных решений модельных задач их точным решениям в трехмерной постановке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00446).

Литература:

1. Zhavoronok S.I. A Vekua-type linear theory of thick elastic shells // ZAMM. – 2013. – P.1-21. – DOI 10.1002/zamm.201200197.
2. Векуа И.Н. Некоторые общие методы построения различных вариантов теории оболочек. – М.: Наука, 1982. – 282 с.
3. Meunargia T. On some refined theories of plates and shells // Bull. of TICMI. – 2010. Vol.14. – P.24-32.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ 1421

Землякова Н.В.

ФГБУН Институт проблем машиностроения НЦ РАН, г. Нижний Новгород

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Li широко применяют в авиационной промышленности, так как они имеют повышенную прочность, хорошую коррозионную стойкость, хорошую свариваемость, высокий модуль упругости, низкую плотность материала. К недостаткам этих сплавов относят низкую технологическую пластичность материала из-за повышенного содержания S-фазы по границам зерен. Известно, что эта фаза выпадает при охлаждении пересыщенного твердого раствора с температуры закалки 480°C. Уменьшить количество S-фазы в материале можно последующей термомеханической обработкой (ТМО) материала, если снизить температуру нагрева при деформировании, или увеличить скорость деформирования материала.

В работе комплексными методами изучено изменение свойств алюминиевого сплава 1421 с размером зерна 20 мкм при двух режимах. ТМО 1: при РКУП обработке по маршруту Вс, 8 проходов при температуре 420°C, затем - 4 прохода при 350°C при скорости деформирования ~28мм/с. ТМО 2 при деформацию при 20°C, со скоростью деформирования $3 \cdot 10^{-3}$ по методу Кольского. ТМО 3:закалка + ТМО 2, ТМО 4: ТМО 1+ закалка + ТМО 2. Фазовые превращения в сплаве изучали термоаналитическим методом на приборе NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix. Погрешность ДСК метода составляет менее 2%. Механические свойства изучали при измерении микротвердости и при динамическом сжатии по методу Кольского, металлографическим методом измеряли размер зерна на микроскопе NEOPHOT-32 при увеличении $\times 2000$. По технологии обработки сплава 1421 перед ТМО 1 всегда применяют гомогенизацию, а потом закалку сплава.

В результате проведенной работы получено, что после обработки крупнозернистого сплава по режиму ТМО 1 происходит уменьшение размера зерна с 20 мкм до 1 мкм, снижение микротвердости с 1080МПа до 980МПа, незначительно изменяется выделение S-фазы по сравнению с крупнокристаллическим материалом. При обработке по режиму ТМО 2 происходит повышение микротвердости, размер зерна не изменяется, а содержание S-фазы подавляется по сравнению с КЗ состоянием. Обработка КЗ сплава 1421, состоящая из последовательно двух ТМО 1 и ТМО 2 обработок позволяет получить следующий набор свойств материала сплава: зерно ~1мкм, при подавлении выделения S-фазы, динамическая деформация $\epsilon_d=18\%$ остается без изменения по сравнению с КЗ состоянием. Использование режима ТМО 1 + закалка + ТМО 2 приводит к незначительному росту зерна до 3 мкм, увеличению динамической деформации с 18% до 26% при подавлении выделения S-фазы. Таким образом, комплексный подход к деформированию КЗ алюминиевого сплава 1421 позволяет улучшить пластические свойства сплава 1421.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЁРДОСТИ НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ, АРМИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ НАНОТРУБОК

Иванов А.В., Ивлиева В.В., Касимовский А.А., Попова Н.А.

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», РХТУ, г. Москва

Керамики являются перспективным классом высокотемпературных материалов, однако керамики обладают высокой хрупкостью, из-за чего не всегда можно реализовать их высокотемпературный потенциал. Одним из способов повышения ударной вязкости и трещиностойкости данного материала является создание керамических наноккомпозитов, армированных углеродными нанотрубками (УНТ), которые обладают уникальными прочностными характеристиками.

В данной работе исследовалось влияние введения многослойных углеродных нанотрубок в керамическую матрицу на микротвёрдость получаемого материала в широком диапазоне концентраций нанотрубок. В качестве керамической матрицы использовался зелёный карбид кремния. С помощью рентгеновской приставки растрового электронного микроскопа был проведён элементный анализ исходной шихты, который показал, что основную матрицу составляет чистый карбид кремния (45,74 ат.% Si и 54,26 ат.% C). Характерный размер зёрен 4-6 мкм. Образцы наноккомпозитов были получены методом электроимпульсного плазменного спекания при температурах 1900–2050°C. Для улучшения спекания в исходную шихту вводилось до 1% аморфного бора. Концентрация многослойных углеродных нанотрубок составила 3, 5, 10, 20 и 30 масс.%. Пикнометрическая плотность наноккомпозиционных материалов изменялась от 95% теоретической плотности карбида кремния для малой концентрации УНТ до 80% теоретической плотности для образцов с содержанием нанотрубок более 20%.

Микротвёрдость по Виккерсу измерялась методом микроиндентирования. Максимальным значением микротвёрдости обладают образцы, спечённые при температуре больше 2000°C (либо равной 2000°C, но с большей выдержкой при температуре спекания) при малом содержании углеродных нанотрубок. При увеличении концентрации армирующего элемента значение микротвёрдости падает. Для образцов, спечённых при более низкой температуре и концентрации нанотрубок более 5%, определить твёрдость методом микроиндентирования не представляется возможным, поскольку структура материала не позволяет получить чёткого отпечатка индентора на поверхности шлифа образца. В таблице 1 приведены результаты измерений микротвёрдости наноккомпозита на основе карбида кремния, армированного УНТ.

Таблица 1 – Микротвёрдость наноккомпозита на основе карбида кремния и УНТ.

Образец №	Температура спекания, °C (выдержка, мин)	Концентрация МУНТ, %	Микротвёрдость по Виккерсу, ГПа
1	1900 (выд. 5 мин)	3	16,8
2	2000 (выд. 5 мин)	3	29,2
3	1950 (выд. 20 мин)	5	11,6
4	2050 (выд. 20 мин)	5	31,1
5	1950 (выд. 5 мин)	10	20,9
6	2050 (выд. 20 мин)	10	25,3
7	2050 (выд. 20 мин)	20	24,4
8	2000 (выд. 45 мин)	30	26,8

О СПОСОБЕ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВИБРОИСПЫТАНИЙ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ ВЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Козлов К.С.¹, Данилин А.Н.²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Разработка гасителей, обеспечивающих эффективное демпфирование колебаний провода в эксплуатационном диапазоне частот (от 3 до 150 Гц) при минимальном количестве типоразмеров, представляет большие трудности, преодолеть которые до последнего времени не удавалось. Предварительные расчеты и экспериментальные исследования показывают, что гасители с несимметричными грузами имеют более равномерное распределение энергии рассеивания по диапазону рабочих частот. Также установлено, что использование эксцентричных грузов с различными массами, а также тросиков с различными длинами (плечами) позволяет получить многочастотный гаситель с 4-9 собственными частотами (2 рабочих частоты имеет гаситель Стокбриджа). Это обеспечивает гашение вибрации в широком диапазоне рабочих частот колебаний проводов и тросов и существенно снижает количество типоразмеров гасителей. Экспериментальные исследования энергорассеивания гасителей вибраций проводов ВЛ занимают ключевую роль в анализе их эффективности.

В исследованиях использовался электродинамический вибростенд с системой автоматического опроса датчиков ускорения вибростола и силы взаимодействия вибростола и гасителя колебаний через устройство крепления. Датчик ускорения устанавливался на вибростоле, датчики силы – на стойках устройства крепления гасителя. Скорость вибростола вычислялась измерительной системой автоматически, интегрированием сигнала ускорения. Поскольку опрос датчиков осуществлялся со значительной частотой (десятые и сотые доли Гц), массивы данных оказались весьма объемными. Поэтому, информация обрабатывалась частями, при последовательном считывании информации из общего массива данных.

Мощность диссипации W оценивалась тремя способами: 1) интегрированием по формуле: $W = 1/T \cdot \int_0^T Fv dt$, где T – период колебаний, F – суммарная сила, измеряемая датчиками силы, v – скорость возбуждения, t – параметр времени; 2) вычислениями по формуле $W = 1/2 \cdot \rho_F \rho_V \cos(\varphi_F - \varphi_V)$, где ρ_F и ρ_V – амплитудные значения сигналов силы и ускорения, изменяющихся по гармоническому закону, φ_F и φ_V – значения фаз для силы и скорости, соответственно; 3) вычислениями по модифицированной формуле $W = 1/2 \cdot \rho_F \rho_V \cos(\varphi_F - \varphi_V + \psi)$, учитывающей рассогласование фазы ψ между скоростью и ускорением вибростола.

Для получения гармоник начальный сигнал заменялся синусоидальным приближением, найденным по методу наименьших квадратов. Таким способом вычислялся несущий сигнал, который затем вычитался из общего сигнала для определения высших гармоник. Знание синусоидальных сигналов скорости и силы для данной частоты возбуждения позволяет вычислить разность фаз, входящую в формулу второго метода. Последовательное разложение общего сигнала на сумму гармонических сигналов позволяет также построить суммарный сигнал без наведённых помех, вызванных, например, влиянием электромагнитного внешнего излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-01-00471-а.

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА БУТАДИЕНА И СТИРОЛА

Корнев Ю.В., Яновский Ю.Г., Бойко О.В., Чиркунова С.В., Гусева М.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам создания материалов нового поколения, в том числе полимерных и эластомерных композитов, наполненных наноматериалами различной природы и структуры. Углеродные нанотрубки являются перспективными объектами, позволяющими создавать материалы с принципиально новыми свойствами. Нанотрубки могут обладать большей, чем у наночастиц, удельной поверхностью (350–500 м²/г) и, при относительно высокой стоимости, как правило, рассматриваются в качестве добавки в композиты порядка 0,01–10% по массе. В настоящей работе поставлена задача исследования влияния добавок углеродных нанотрубок на механические и технологические свойства эластомерных материалов на основе матрицы из сополимера бутадиена и стирола (каучук СКС-30АРК).

В качестве исходных образцов были выбраны углеродные нанотрубки, синтезированные методом CVD в ИПРИМ РАН с применением катализаторов Fe/Al₂O₃ и Co/Al₂O₃. В результате проведения реакции на данных катализаторах получается порошок чёрного цвета. Его агломераты микрометровых размеров имеют структуру переплетённых пучков многостенных углеродных нанотрубок длиной более 2 мкм со средним наружным диаметром 20 нм. Углеродные нанотрубки вводились в эластомерные композиции на основе СКС-30АРК в количестве 0,3 % (масс.). В ходе эксперимента по оценке кинетики вулканизации было установлено увеличение максимального крутящего момента для смесей, наполненных углеродными нанотрубками, полученными на катализаторе Fe/Al₂O₃, также, для данных образцов наблюдается увеличение индукционного периода вулканизации по сравнению с образцом без добавки. Установлено, что смеси наполненные нанотрубками имеют более высокую скорость вулканизации в главном периоде, в сравнении с ненаполненной смесью. Полученные механические характеристики для эластомерных материалов, с добавками углеродных нанотрубок, показывают заметное увеличение напряжений при удлинении, а также увеличение прочности (на 55%) по сравнению с исходным ненаполненным образцом. Также установлено, что влияние на механические свойства оказывает и тип катализатора. При введении нанотрубок в эластомерные материалы, отмечается снижение относительного гистерезиса, что особенно интересно в сочетании с увеличением удельной работы деформации на разрушение образцов, модуля упругости и прочности полученных композитов в сравнении с исходным образцом. Добавление углеродных нанотрубок (0,3% масс.) в наполненные эластомерные композиты (где уже присутствует до 30% масс. основного наполнителя) приводит к меньшим эффектам, в частности наблюдаемый прирост прочности составляет до 25%. Для образцов, наполненных наношунгитом (30% масс.) в качестве основного наполнителя, введение добавок УНТ практически не влияет на упруго-прочностные свойства, что говорит о высокой упрочняющей активности наношунгита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-01-00932).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО И ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ГТД С КЕРАМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ВЧ НАГРЕВЕ

Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г.

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) новых поколений необходимо улучшать теплозащиту их деталей. Среди множества технологий нанесения теплозащитных керамических покрытий лучшую теплозащиту при высоком сопротивлении термической усталости обеспечивает электронно-лучевой метод. Испытания лопаток с покрытиями и других деталей в газодинамическом потоке дороги и длительны. Существенно дешевле и оперативнее использовать высокочастотный (ВЧ) индукционный нагрев. Физика ВЧ нагрева представляет собой не только индукционный нагрев токопроводящих материалов, в том числе полупроводников, но и диэлектрический нагрев диэлектриков, к которым относятся и керамические материалы.

В данной работе приведены исследования теплового и термонапряженного состояния лопаток с керамическими теплозащитными покрытиями (ТЗП) и других охлаждаемых деталей ГТД с учетом физики ВЧ нагрева при испытаниях.

По результатам экспериментальных исследований и конечно-элементных расчетов в этих условиях при скорости нагрева 100 К/с была получена на наружной поверхности модели детали с ТЗП, контактирующей с окружающей средой, температура примерно на 60÷80°C выше, чем на границе перехода металл – ТЗП, т.е. имитируется температурное состояние изделия в эксплуатации. При этом на поверхности металла наблюдались сжимающие термонапряжения 100 МПа и растягивающие термонапряжения 30÷40 МПа со стороны керамического ТЗП.

Температура ТЗП и жаростойкого слоя регистрировались тепловизором одновременно. Выполненные экспериментальные исследования и измерения температуры детали с ТЗП с помощью тепловизора при термоциклировании подтвердили расчетную величину перепада температуры по толщине покрытия.

На основе многовариантных расчетов получена обобщенная зависимость перепада температуры по толщине керамического покрытия в функции частоты электрического тока при изменении частоты тока от 200 до 2000 кГц.

Результаты испытаний, проведенные по разработанному методу на установке с ламповым генератором ВЧГ4-10/0,44 и с разъемным индуктором, на термоусталость рабочих лопаток турбин ГТД при термоциклировании по режиму $t_{\min} \leftrightarrow t_{\max}$ 350 ↔ (900-1000)°C показали, что термоциклическая долговечность лопаток с керамическим ТЗП, нанесенного по электронно-лучевому методу, возросла в среднем в 3,4 раза по сравнению с лопатками из жаропрочного никелевого сплава без покрытия.

КОНСТРУКЦИОННЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ В СИСТЕМЕ $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$

Лукин Е.С., Попова Н.А., Павлюкова Л.Т.

Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, г. Москва

Широкое исследование космоса привело к необходимости разработки для космических систем новых конструкционных керамических материалов. Такими материалами являются керамика из чистых оксидов и бескислородных соединений.

Карбид кремния (SiC) является одним из наиболее перспективных бескислородных тугоплавких соединений для получения конструкционных материалов высокотемпературного применения. Это объясняется наличием уникальных теплофизических и механических свойств, присущих карбиду кремния. Однако изделия из SiC окисляются при температурах выше 1400°C , что существенно ограничивает их высокотемпературное применение.

Из-за ковалентного характера связи Si-C получение высокоплотного и прочного материала на основе карбида кремния затруднено, и он может быть уплотнен горячим прессованием или с помощью добавок, которые обычно уменьшают энергию границ зерен SiC и активируют массоперенос в процессе спекания.

Активирование процесса спекания и повышение окислительной стойкости керамики на основе SiC возможно за счет применения специальных технологических приемов, к которым относятся введение спекающих добавок отдельных тугоплавких оксидов. Совместное использование нанодисперсного порошка оксида и высокодисперсного порошка карбида кремния создает за счет экранирующего эффекта защиту от окисления SiC по всему объему материала.

В основе выбора добавки для создания композиции на основе карбида кремния лежат термодинамические вычисления и результаты исследований, в ходе которых выяснено, что многие оксиды способствуют диссоциации карбида кремния при нагревании с выделением газообразных продуктов реакции. Только к некоторым оксидам карбид кремния проявляет стабильность до высоких температур, среди которых тугоплавкий оксид алюминия (Al_2O_3).

Введение нанодисперсного MgO в количестве до 5 мас.% в оксид алюминия позволяет получить мелкокристаллическую структуру керамики. Оксид магния сдерживает рост кристаллов Al_2O_3 за счет образования на границе зерен корунда алюмомагнезиальной шпинели, которая в свою очередь позволит избежать высокотемпературного взаимодействия оксида алюминия с карбидом кремния.

Горячим прессованием при 1800°C получен композиционный материал в системе $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$, легированного оксидом магния, со следующими свойствами – открытой пористостью менее 10%, прочностью на изгиб до 300 МПа и микротвёрдостью по Виккерсу до 21 ГПа.

На полученной горячепрессованной конструкционной керамике на основе карбида кремния проведены испытания по определению теплоэрозионной стойкости, линейного уноса при воздействии высокотемпературного сверхзвукового паровоздушного газового потока.

При указанных газодинамических параметрах набегающего паровоздушного потока со скоростью 360 м/с, с нагревом до 1450°C за 2 секунды, до 1800°C за 20 секунд – унос, окисление и потери механической прочности и твердости конструкционного материала полностью отсутствуют. По результатам рентгенофазового анализа изменение фазового состава керамики после испытаний

не происходит. Конструкционный керамический материал в системе SiC-Al₂O₃(MgO) рекомендован для изготовления деталей, используемых в жидкостных ракетных двигателях малой тяги.

ПРОЧНАЯ И ТВЕРДАЯ ПРОЗРАЧНАЯ КЕРАМИКА ИЗ АЛЮМОМАГНЕЗИАЛЬНОЙ ШПИНЕЛИ

Лукин Е.С., Попова Н.А., Павлюкова Л.Т.

Российский химико-технологический университет им.Д.И.Менделеева, г. Москва

Алюмомагнезиальная шпинель ($MgAl_2O_4$) – бинарное термодинамически устойчивое соединение с кубической кристаллической структурой, обладает редкой комбинацией ценных свойств: механическая прочность и твердость, химическая инертность к агрессивным средам, высокая термостойкость и превосходные оптические показатели. Шпинель имеет высокое и стабильное светопропускание от ультрафиолетовой до середины инфракрасной областей (0,2-5,5 мкм) электромагнитного излучения.

Преимущество керамики с высокой прозрачностью на основе $MgAl_2O_4$ связано, прежде всего: - с изотропностью структуры, так как кубическое строение решетки позволяет избежать рассеивания света из-за отличия в показателях преломления по осям кристалла, и как следствие постоянным светопропусканием до 92% в видимой области спектра; - с высокой температурой плавления (2130°C) и невысокой плотностью (3,58 г/см³).

Большое влияние на свойства прозрачной керамики оказывают состояние исходного порошка, такие как химическая однородность и чистота, содержание частиц нанометрового диапазона и реакционная способность к спеканию, характеризующая концентрацию дефектов кристаллической решетки. По различным литературным данным образование кубической алюмомагнезиальной шпинели происходит (в зависимости от метода получения прекурсора) при температурах 450-1500°C, интенсивное образование шпинели протекает в интервале температур 850-1300°C. Спекание керамики на основе алюмомагнезиальной шпинели протекает при достаточно высоких температурах до 1900°C, что влечет неизбежное испарение керамики и существенно оказывает влияние на стехиометрию $MgAl_2O_4$ и светопропускание материала. С ростом температуры растет и скорость испарения алюмомагнезиальной шпинели. Обеспечить постоянство состава, не нарушая стехиометрии, возможно применив определенные условия термообработки.

Импульсным плазменным спеканием при 1550°C нами получен высокопрозрачный поликристаллический материал на основе алюмомагнезиальной шпинели с добавкой фторида лития. В качестве исходных компонентов использовали γ -форму нанодисперсного оксида алюминия (чистота 99,9+%) и высокодисперсный оксида магния, полученного прокаливанием карбоната магния (чистота 99,9+%). Структурное сходство кубической γ - Al_2O_3 , гомогенное смешение с оксидом магния и высокая реакционная способность полученных прекурсоров позволила получить стехиометричную шпинель при относительно низкой температуре синтеза. Введение в количестве до 1 мас.% фторида лития, выступающей в роли уплотняющей добавки, способствует образованию в процессе обжига жидкой фазы, тем самым облегчая процесс удаления пористости. Вводимая добавка фторида лития оказывает влияние на микроструктуру материала, приводит к росту изометричных кристаллов, удалению пограничных фаз, и повышению светопропускания $MgAl_2O_4$ и прочностных характеристик материала.

Светопропускание полученного материала на основе алюмомагнезиальной шпинели с относительной плотностью > 99%, достигает 70-72% в видимой области спектра; механическая прочность составила 180 МПа, микротвёрдость по Виккерсу 13,2 ГПа.

КОНТИНУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АДГЕЗИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

Лурье С.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Обсуждается континуальная линейная модель адгезионных взаимодействий, которая строится на основе вариационного подхода. Анализируются определяющие соотношения на поверхности деформируемых тел, обсуждаются особенности структуры адгезионных модулей упругости, приводится их физическая трактовка. Дается сравнение развиваемой модели с феноменологической моделью Янга-Лапласа. Приводятся примеры моделирования известных поверхностных эффектов. Исследуются условия существования и единственности решений теории упругости с неклассическими краевыми условиями, учитывающими адгезионные эффекты.

Обсуждается также градиентная теория сред, в которой адгезионные свойства моделируются наряду с локальными взаимодействиями когезионного типа в рамках единого подхода как масштабные эффекты. Приводятся примеры моделирования известных адгезионных эффектов, примеры объяснения некоторых известных, экспериментально обнаруженных поверхностных эффектов в твердых телах.

Для проверки адекватности градиентной модели когезионно-адгезионных взаимодействий при описании свойств существенно неоднородных структур дается сравнение полученных тестовых континуальных решений с решениями, найденными с использованием дискретной атомистической модели. Приводятся примеры использования градиентной модели межфазного слоя, учитывающей когезионно-адгезионные эффекты, для моделирования аномальных физико-механических свойств наполненных композитов с микровключениями.

Работа поддерживается грантами РФФИ 12-01-00273 и 13-01-00872

НЕЛИНЕЙНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Для прогнозирования упругих и прочностных свойств композитов рассматривается постановка нелинейных многоуровневых краевых задач механики композитов, учитывающая стадии упругого и структурного накопления микрповреждений.

В качестве математической модели процесса квазистатического деформирования и разрушения ставится детерминированная или стохастическая краевая задача механики композитов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{i\alpha}}{\partial x_\alpha} &= 0; \quad \sigma_{ij}(r) = \theta_{ij\gamma\delta}(r) [I_{\gamma\delta\alpha\beta} - \omega_{\gamma\delta\alpha\beta}(\varepsilon_h, r)] \varepsilon_{\alpha\beta}(r); \\ \varepsilon_{ij}(r) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad u_i(r)|_{\bar{A}_u} = u_i^0; \quad \sigma_{i\alpha}(r) n_\alpha|_{\bar{A}_\sigma} = S_i^0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sigma_{ij}(r)$, $\varepsilon_{ij}(r)$, $u_i(r)$, $\theta_{ijmn}(r)$ – структурные поля напряжений, деформаций, перемещений и упругих модулей соответственно; u_i^0 , S_i^0 – соответственно заданные граничные перемещения и нагрузки.

Тензор структурных микрповреждений матрицы считается известным согласно теории малых упругопластических деформаций. Законы деформирования волокон считаются упругими вплоть до разрушения и описываются упругой моделью изотропной или трансверсально изотропной среды. В основу метода численного решения краевой задачи (1) положен принцип локальности, согласно которому в расположении и взаимодействии структурных компонентов имеет место ближний порядок [1]. Для четырёх типов однонаправленных волокнистых стекло-, угле-, органо- и боропластиков рассчитаны эффективные модули упругости, построены предельные поверхности прочности в трансверсальной плоскости [2].

Данный подход позволяет прогнозировать упругие и прочностные характеристики гибридных композитов с полимерной матрицей, упрочненной углеродными углеродными многослойными нанотрубками и непрерывными волокнами. Свойства матрицы определяются экспериментально.

Литература:

1. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 116 с.
2. Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В. Нелинейные многоуровневые модели механики деформирования и разрушения композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т.19. – №3. – С.395-405.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ФАЗОВО-СТРУКТУРНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В РАМКАХ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Мишустин И.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Изложена нелинейная модель деформирования сплава с памятью формы (СПФ), в которой рассматриваются характеристики не только представительного объема в целом, но и отдельных совокупностей мартенситных образований в нем. Модель учитывает факт отсутствия деформационного упрочнения в процессе накопления деформаций прямого фазового превращения и описывает как обычное, так и перекрестное упрочнение, наблюдаемое в экспериментах по мартенситной неупругости. Также она позволяет учесть различия в поведении мартенситных образований под нагрузкой, вызванные разными условиями их формирования и историей нагружения. Если на каком-то этапе формирования мартенсита происходит падение интенсивности напряжений, то последующий ее рост может вызвать структурный переход (раздвойникование и переориентацию мартенситных образований) не во всем представительном объеме. В этом процессе не будут участвовать те совокупности мартенситных образований, для которых пороговое напряжение, связанное с интенсивностью их фазово-структурной деформации, выше текущего значения интенсивности напряжений. Введено понятие объемной доли мартенсита, участвующего в структурном переходе, и описан алгоритм ее определения по графику зависимости интенсивности напряжений от объемной доли мартенсита.

Получено численное решение одномерной задачи о деформировании СПФ при заданных законах изменения напряжения и температуры. В общем случае наряду с зарождением происходит рост мартенситных образований, а распределения микронапряжений в аустените и мартенсите описывают разные функции. Немонотонное изменение напряжений в ходе прямого фазового превращения приводит к формированию совокупностей мартенситных образований с разными пороговыми напряжениями, одновременному протеканию на отдельных этапах фазового и структурного переходов с меняющейся долей мартенсита, участвующего в структурном переходе. Изучено влияние на результаты расчета различных параметров модели и режимов изменения напряжения и температуры. Проведено сравнение предложенной модели с альтернативными вариантами учета структурного перехода в СПФ – гипотезами о едином пороговом напряжении для всего представительного объема и об отсутствии порогов.

Работа выполнена при финансовом содействии Программы Президиума РАН №25 (проект «Многомасштабное моделирование и экспериментальные исследования функциональных свойств и работоспособности сплавов с памятью формы»).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОНОМНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Проявления реономных свойств сплавов с памятью формы (СПФ) наблюдались в экспериментальных работах достаточно давно, однако большинство исследователей связывают эти эффекты с неизотермичностью наблюдаемых процессов, реономностью явлений теплопередачи и теплопроводности. Ситуация в опытах, сопровождающих термоупругие мартенситные фазовые превращения осложняется в связи с трудностью поддержания изотермического режима в таких процессах из-за поглощения и выделения достаточно больших количеств латентного тепла фазовых переходов. В связи с этим обстоятельством, прежде всего были поставлены опыты по мартенситной неупругости, когда имеет место структурное превращение, но отсутствует фазовое и поэтому не представляет труда добиться изотермичности процесса. Испытывались образцы из равноатомного никелида титана.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при жестком изотермическом нагружении в режиме мартенситной неупругости форма диаграммы растяжения зависит от скорости деформирования (большей скорости соответствует меньшая деформация при том же значении напряжений). При мягком ступенчатом изотермическом нагружении в том же режиме обнаружено явление ограниченной ползучести (развитие во времени деформаций при постоянном напряжении после его скачкообразного увеличения). После жесткого нагружения и последующей фиксации формы образца в изотермическом режиме наблюдается падение напряжений со временем тем более интенсивное, чем с большей скоростью происходило предварительное нагружение.

Эффекты ограниченной ползучести обнаружены также при мягком изотермическом нагружении в режиме сверхупругости. При мягкой ступенчатой изотермической разгрузке в режиме сверхупругости обнаружено явление уменьшения со временем величины деформации при постоянном напряжении после его скачкообразного уменьшения. В данном случае имеют место прямой и обратный фазовые переходы, однако можно показать, что явления выделения и поглощения латентного тепла фазового перехода в проведенных опытах должны препятствовать, а не способствовать наблюдаемым механическим эффектам.

Проведены эксперименты по прямому термоупругому мартенситному превращению под действием постоянного напряжения при охлаждении образца с различными скоростями. Установлено, что деформация, накопленная при полном прямом превращении при прочих равных условиях, несколько уменьшается при возрастании скорости охлаждения. Аналогично, в опытах по обратному превращению обнаружено, что возвращаемая при полном обратном превращении деформация несколько уменьшается при увеличении скорости нагрева. Проведены опыты по обратному термоупругому мартенситному превращению под действием монотонно растущего напряжения. Установлено, что при увеличении скорости нагружения процесс восстановления формы замедляется и при достаточно высокой скорости нагружения может вообще не происходить.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о наличии у СПФ реономных свойств, не связанных с явлениями теплопроводности и теплопередачи.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект № 11-01-00503.

УЧЕТ МГНОВЕННЫХ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОПИСАНИИ РЕОНОМНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Мовчан А.А.¹, Климов К.Ю.²

¹ ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

² Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

В работах [1,2] экспериментально установлено, что сплавы с памятью формы (СПФ) обладают реономными свойствами. В частности, при ступенчатом возрастании нагрузки наблюдается мгновенный рост неупругой деформации, после чего происходит затухающий рост деформации со временем, напоминающий явление ограниченной ползучести. В [3] предложена модель реономного поведения СПФ, согласно которой скорость неупругой деформации пропорциональна разности между деформациями предельно медленного и актуального процесса. В рамках этой модели мгновенные скачки неупругих деформаций СПФ вообще не учитываются. В [4] предложена модель, согласно которой скорость неупругой деформации является дробно-линейной функцией этой деформации, равной нулю для предельно медленных и бесконечности для предельно быстрых процессов. Данная модель учитывает возможность мгновенных скачков неупругой деформации при скачках напряжений, однако интегрирование уравнений модели сопряжено с математическими трудностями, связанными с нарушением условий теоремы единственности решений.

Для описания всего комплекса реономных свойств СПФ предлагается аналог вязкопластической модели, согласно которому постулируется существование двух классов склерономных процессов в СПФ - предельно быстрых и предельно медленных. Неупругая деформация СПФ складывается из мгновенной, соответствующей предельно быстрым процессам и реономной, скорость которой пропорциональна разнице между деформацией предельно медленного процесса и реальной неупругой деформацией. В рамках предложенной модели рассмотрены мягкое и жесткое монотонное нагружение в режимах мартенситной неупругости и сверхупругости, нагружение и последующая разгрузка, ступенчатое нагружение и ступенчатая разгрузка, явление релаксации напряжений [2]. Получено адекватное описание всех перечисленных процессов, в том числе - правильное отражение мгновенных скачков неупругих деформаций, сопровождающих скачки напряжений. Выявлены преимущества предлагаемой модели перед ранее предложенными [3,4].

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект № 11-01-00503.

Литература:

1. Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг. Реономные свойства сплавов с памятью формы, проявляемые в опытах на мартенситную неупругость и сверхупругость // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т.16. – №3. – С.305-311.
2. Мовчан А.А., Казарина С.А. Релаксация напряжений в сплавах с памятью формы после нагружения в режиме мартенситной неупругости // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – №2. – С.17-23.
3. Movchan A.A., Klimov K.Yu. Simulation of rheonomic properties of shape memory alloys // Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal. – 2011. – Vol.3. – Iss.2. – P.171-185.
4. Мовчан А.А., Климов К.Ю. Модель реономного поведения сплавов с памятью формы, использующая гипотезы о склерономности предельно медленных

и предельно быстрых процессов нагружения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2011. – Т.17. – №4. – С.508-522.

ЗАДАЧИ ПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Мовчан А.А.¹, Машихин А.Е.², Саганов Е.Б.³

¹ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

²Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва

Критерии работоспособности сплавов с памятью (СПФ), как элементов адаптивных конструкций отличаются от требований по жесткости прочности и трещиностойкости, предъявляемых к обычным конструкционным материалам. Сформулированы два предельных критерия для СПФ, первый из которых связан с возможностью воспринимать внешнюю нагрузку за счет процесса деформирования этих материалов по фазово-структурному механизму, а второй сводится к недопущению в процессе эксплуатации элементов из СПФ пластических деформаций, имеющих дислокационную природу. Для реализации предложенных критериев предложен некоторый аналог жестко-пластического анализа, сводящийся к пренебрежению упругими деформациями по сравнению с фазово-структурными.

В рамках модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [1] и доказанного ранее положения об активных процессах пропорционального нагружения СПФ [2] сформулированы и решены задачи о предельном деформировании толстостенных цилиндрической и сферической оболочек, изгибаемой балки и закручиваемого стержня из СПФ. Следует отметить, что в рамках первого критерия задача определения предельной нагрузки для однородных напряженных состояний не имеет смысла (предельная нагрузка равна бесконечности), тогда как для рассмотренных неоднородных состояний предельные нагрузки имеют конечные значения, выражающиеся несобственными интегралами, сходимости которых доказана. Найдены выражения для предельных значений кинематических параметров, например, максимальных значений смещений точек внутренних поверхностей толстостенных сферы и цилиндра, испытывающих прямое термоупругое мартенситное превращение под действием постоянного внутреннего давления. Тем самым решена важная прикладная задача о моделировании нового способа предварительной раздачи соединительной муфты из СПФ.

Для контроля полученных результатов задача о толстостенной цилиндрической оболочке решена аналитически с учетом упругих деформаций, а также численно методом конечных элементов. Установлено, что учет упругих деформаций ведет к некоторому завышению предельных характеристик, так что пренебрежение упругими деформациями дает результаты с небольшим запасом, однако приводит к существенному упрощению процесса решения. Полученные аналитические решения выгодно отличаются от численных, найденных методом конечных элементов.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект № 11-01-00503 и Программы Президиума РАН № 25 (проект «Многомасштабное моделирование и экспериментальные исследования функциональных свойств и работоспособности сплавов с памятью формы»).

Литература:

1. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – №3. – С.118-130.
2. Мовчан А.А., Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л. Учет явления мартенситной неупругости при обратном фазовом превращении в сплавах с памятью формы // Изв. РАН. МТТ. – 2011. – №2. – С.44-56.

УГЛЕПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОРОШКОВЫХ НАНОКОМПОЗИЦИЙ

Молчанов Е.С.¹, Юдин В.Е.², Кыдралиева К.А.¹,
Елоховский В.Ю.², Ваганов Г.В.², Иванькова Е.М.², Бакулин В.Н.³

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

²*Институт высокомолекулярных соединений РАН, г. Санкт-Петербург*

³*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

Системы космических аппаратов, высотных самолетов, детали и узлы транспортных машин работают в условиях умеренного и глубокого охлаждения, поэтому применяемые для их изготовления конструкционные материалы должны обеспечивать надежную работу аппаратов, машин и механизмов в заданных температурных условиях. Настоящее исследование посвящено изучению влияния температуры на механические свойства углепластиков на основе эпоксидных порошковых композиций, модифицированных наночастицами различной структуры и морфологии.

Одной из важнейших задач при использовании нанонаполнителей является обеспечение их равномерного (либо заданного, например, в случае функционально-градиентных материалов) распределения в матрице композита. Свойства нанокompозитов такого типа могут изменяться при очень малых изменениях концентрации наполнителя, благодаря его большой удельной поверхности и интенсивному межмолекулярному взаимодействию с полимером. В ходе исследования полимерных связующих – эпоксидных или полиимидных, содержащих наноразмерные углеродные или силикатные частицы показано, что помимо традиционного повышения упругих характеристик полимерной матрицы при малом содержании наночастиц возможно также повышение трещиностойкости таких материалов. Механизм этого повышения трещиностойкости до конца непонятен и, например, в случае трубок галлуазита объясняется образованием «мостиков» из этих трубок, связывающих берега трещины и препятствующих её распространению.

Выбор наночастиц монтмориллонита (ММТ) в качестве одного из наполнителей обусловлен высокой удельной поверхностью, высокой подвижностью и пластичностью слоистой структуры ММТ, что позволяет получать интеркалированные и эксфолиированные структуры. Уникальные свойства и структура галлуазита (НТ), такие как многостенная структура, подобная углеродным нанотрубкам, низкая токсичность, биосовместимость, доступные ресурсы и низкая стоимость, позволяют рассматривать наночастицы галлуазита как альтернативу углеродным нанотрубкам для производства нанокompозиционных материалов. Структура и состав слоистых силикатов, их физико-химические свойства, природа активной поверхности достаточно давно и детально изучены. Углеродные наполнители, такие как углеродные нановолокна (УНВ) и нанопластины или наноконусы (СС), являются некой альтернативой с точки зрения химической структуры алюмосиликатам ММТ и НТ, но подобны им с точки зрения морфологии, то есть трубчатой и пластинчатой. Таким образом, подобное исследование должно в какой-то степени ответить на вопрос – какого типа наночастицы целесообразно вводить в эпоксидную матрицу для повышения трещиностойкости, а также других механических характеристик углепластиков на её основе.

О ФРАГМЕНТАЦИИ УДАРНИКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОБИТИИ ТОНКОГО ЭКРАНА

Мягков Н.Н., Силантьев М.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

С помощью численного 3D моделирования методом гладких частиц (smoothed particle hydrodynamics-SPH) мы рассматривали задачу о фрагментации алюминиевого ударника на тонком стальном сеточном экране при высоких скоростях удара. Мы дали количественную характеристику разрушения ударника, выраженную в статистике облака фрагментов, и изучали природу перехода от состояния повреждения к состоянию фрагментации ударника при изменении скорости удара, т.е. при изменении энергии, передаваемой ударнику при ударе. Поведение материалов описывалось уравнением состояния Ми-Грюнайзена, и моделью пластичности Джонсона-Кука. В качестве критерия разрушения был выбран простейший критерий по максимальному главному напряжению. Выбор сетки в качестве экрана позволяет значительно уменьшить массу фрагментов, образующихся при разрушении экрана, и тем самым ограничить их влияние на разлет фрагментов ударника за счет вторичных взаимодействий. В работе результаты расчетов представлены только для фрагментов ударника.

Важно отметить, что в известных нам работах по численному моделированию фрагментации в механических системах фрагментируемый объект описывался или набором тождественных частиц, связанных между собой парным потенциалом (по аналогии с методом молекулярной динамики - см., например, [1]), или множеством элементов различной формы, связанных друг с другом разными типами невесомых связующих элементов (см., например, [2]). Динамика частиц (элементов), включающая как поступательное, так и вращательное движение, описывалась в этих моделях системой уравнений Ньютона.

Численное моделирование на базе полной системы 3D уравнений МДТТ (методом SPH) позволяет, по крайней мере, проверить выводы, сделанные ранее различными авторами на базе упрощенных моделей, а также выявить влияние величины предельного напряжения разрушения на получаемые результаты.

Основные выводы работы могут быть сформулированы следующим образом.

– Результаты моделирования фрагментации на основе уравнений МДТТ (методом SPH) согласуются с результатами моделирования, выполненными ранее на базе упрощенных механических моделей.

– Моделирование показало, что процесс разрушения ударника, в зависимости от скорости удара, может быть разделен на два состояния, т.е. состояния поврежденности и фрагментации с резким переходом между ними при критическом значении скорости удара V_c . Анализ поведения системы вблизи критической точки показал, что этот переход подобен фазовому переходу. Аналогичный результат был получен в более ранних работах [2], где расчеты проводились на базе упрощенных механических моделей.

– Как и ожидалось, критическая скорость фрагментации сильно зависит от значения величины предельного напряжения разрушения σ_p : при уменьшении σ_p критическая скорость V_c уменьшается.

– Для средних кумулятивных распределений в промежуточной области масс имеет место степенное распределение фрагментов по массам в широком интервале скоростей удара, приблизительно от 2 до 3 км/сек. Значения показателей степенных распределений зависят от скорости удара немонотонно, принимая минимальные

значения $\tau(V_c) \approx 1.7-1.8$. Подобное немонотонное поведение τ наблюдалось в экспериментах по столкновению тяжелых ядер [3] и в экспериментах по дроблению жидких капель [4].

– Расчеты показывают, что не только показатель степенного распределения $\tau(V_c)$, но и критические показатели γ , β и α зависят от величины предельного напряжения разрушения. Этот результат согласуется с результатом, полученным в работе [5] посредством численного моделирования на базе 3-х мерной упрощенной «модели дискретных элементов» (в оригинале “Discrete Element Model”).

Литература:

1. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. // Physica. A. – 2005. – Vol.358. – P.423-436.
2. Kun F., Herrmann H. // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol.59. – P.2623-2632.
3. Panagiotou D. et al. // Phys. Rev. Lett. – 1984. – Vol.52. – P.496.
4. Moukarzel F. et al. // Phys. Rev. E. – 2007. – Vol.75. – P.061127.
5. Timar G. et al. // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol.104. – P.095502.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕНТОВ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Нуштаев Д.В.¹, Жаворонок С.И.², Клышников К.Ю.³, Овчаренко Е.А.³

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

ФГБУН Российской академии наук Институт прикладной механики, г. Москва

³*ФГБУ НИИ «Комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний» СО РАМН,
г. Кемерово*

Рассматриваются некоторые аспекты моделирования механического поведения стентов. Известно, что осевая жесткость артериальных сосудов достаточно невелика, что позволяет им свободно деформироваться при движении человека без существенных перегибов. При стентировании, помимо положительного эффекта армирования стенок сосуда, происходит локальное увеличение осевой жесткости сосуда в месте установки стента. В зависимости от конструкции стента осевая жесткость стентированного участка может быть существенно увеличена, что ухудшает аккомодацию сосуда. Уменьшение степени аккомодации увеличивает нагрузку на стент и прилегающую к месту стентирования область сосуда, что может привести к большим перегибам и разрушению стента.

Целью работы является создание методики численного моделирования процессов деформирования структурированных систем, к которым относятся стенты, при учете возможного контактного взаимодействия между элементами структуры, свойств материала, не определяемых априори с достаточной точностью, а также исследование влияния геометрических параметров структуры на поведение при осевом сжатии. Рассмотрен процесс деформирования цилиндрического стента при заданной скорости сближения торцов, допускающий экспериментальную реализацию на стандартных разрывных машинах и не приводящий к катастрофическому характеру потери устойчивости - «хлопком». Последнее особо важно для малоразмерных тонкостенных элементов, в том числе и для стентов. Численное моделирование осуществлено стандартными средствами программного комплекса SIMULIA Abaqus в рамках модели упруго-пластического поведения материала в трехмерной постановке задачи. Показано, что оценка критической осевой силы при сжатии в полностью линеаризованной постановке при неучете самоконтакта элементов структуры приводит к заниженному значению силы. Построено численное решение задачи в квазистатической постановке с использованием явной схемы интегрирования уравнений движения с масштабированием во времени, необходимым для исключения влияния сил инерции. Построены кривые равновесных состояний стента и получены значения предельных нагрузок в закритическом состоянии. Проведен параметрический анализ системы и получены оценки влияния основных параметров структуры стента и констант материала на характер кривой. Путем сравнительного анализа экспериментальных и теоретических кривых равновесных состояний показано, что наибольшее влияние на величину предельной нагрузки оказывает величина коэффициента сухого трения и величины областей самоконтакта элементов структуры. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов; теоретическая кривая как в докритическом, так и в закритическом состоянии лежит в доверительном интервале экспериментальных данных. Получена оценка критической силы потери устойчивости. Проведен анализ влияния структуры стента на поведение при осевом сжатии и выработаны некоторые практические рекомендации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-01-00446).

ОБ АДГЕЗИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Ромашин С.Н., Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С.

ФГБОУ ВПО "Государственный университет - УНПК", г. Орел

При формировании и обеспечении функциональной надежности элементов слоистых композитов прямо или косвенно основную роль играет адгезионная прочность соединения их структурных элементов. В проводимых ранее исследованиях авторами [1-3] предложен несовпадающий с общепринятым представлением об этом явлении [4-7] в рамках механики и физики деформируемого твердого тела вариант описания адгезионного контакта сплошных упругих материалов. В работе представлен вывод общепринятого описания явления адгезии как частного случая варианта его описания, представленного в [1-3]. При этом представления работ [4-7] дополнены методами, позволяющими рассчитать потенциал и силу нелокального взаимодействия поверхностей вступающих в адгезионный контакт упругих тел, их поверхностные энергии на основании информации о классических механических свойствах их материалов. Основная гипотеза, положенная в основу представлений, изложенных в работах [1-3], состоит в предположении о нелокальном многочастичном потенциальном взаимодействии как внутри каждого из контактирующих тел, так и между самими телами и последующем его локальном описании.

Работа выполнялась в рамках государственного задания № 2.479.2011.

Литература:

1. Шоркин В.С. Нелинейные дисперсионные свойства высокочастотных волн в градиентной теории упругости // Механика твердого тела. – 2011. – №6. – С.104-121.
2. Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Азаров А.С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // Материаловедение. – 2011. – №2. – С.2-7.
3. Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – №1. – С.235-259.
4. Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Взаимодействие деформируемых тел с учетом сил адгезии / Всеросс. конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы механики». Материалы. – Владивосток, 2006. – С.9-13.
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
6. Jonson K.K., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the contact of elastic solids // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1971. – Vol.324. – №1558. – P.301-313.
7. Баренблатт Г.И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении // Доклады АН СССР. – 1959. – Т.127. – №1. – С.47-50.

СИНТЕЗ ГРАФЕНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХАММЕРСА

Семенов П.Е., Гусева М.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Графен представляет собой двумерную аллотропную модификацию углерода, образованную слоем атомов углерода толщиной в один атом. Атомы углерода находятся в sp^2 -гибридизации и соединены в гексагональную двумерную кристаллическую решетку.

Метод Хаммерса основан на получении оксида графена и его дальнейшем восстановлении. Однако при получении оксида графена образуется большое количество калийной соли меллитовой кислоты. Наша методика получения оксида графена позволила снизить образование побочного продукта, за счет добавления бихромата калия к окислительной смеси. Это привело к более мягкому окислению графита. Более того, это позволило достичь высокого выхода окиси графена – 87,1% и исключить некоторые стадии синтеза по исходному методу – доокисление графита, ультразвуковая обработка.

Литература:

1. Hummers Jr.W.S., Offeman R.E. Preparation of graphitic oxide // J. Am. Chem. Soc. – 1958. – Т.80. – №6. – С.1339.

СИЛИКОНОВЫЕ РЕЗИНЫ С ПОВЫШЕННОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТЬЮ

Семенов Н.А., Юмашев О.Б., Зарайский Е.И., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Эластомерные материалы на основе кремнеорганических соединений получают все большее распространение, что связано с их высокой стойкостью к температурным перепадам, ультрафиолетовому воздействию, старению. Наиболее востребованы в производстве уплотнителей, оболочек для проводов и полимерных изоляторов для линий электропередач силиконовые резины.

В настоящее время в конструкциях высоковольтных линий электропередач в основном применяются изоляторы, изготовленные из фарфора или стекла и из кремнийорганических каучуков. Недостатками фарфора и стекла являются массивность изделий, сложность изготовления, высокая стоимость транспортировки и монтажа, низкая вандалоустойчивость. Существенным недостатком существующих полимерных изоляторов является их быстрое старение, связанное с влиянием атмосферных химических воздействий, бактериологических факторов и механических воздействий. Вследствие старения в материале изолятора возникают дефекты (трекинги, эрозия, мелование и т.д.), которые приводят к снижению электрозащитных свойств и возникновению коротких замыканий. В то же время полимерные изоляторы, в сравнении со стеклянными и фарфоровыми, обладают значительно меньшей массой (в десять раз ниже), просты в производстве, более удобны в транспортировке, монтаже и хранении, обладают более высокой прочностью.

Задача настоящей работы – создание эластомерной композиции на основе кремнеорганического каучука с повышенной стойкостью к биологическому воздействию. Для ее реализации используются микродобавки разработанного в ИПРИМ РАН бактерицидного композита, и проводится модификация поверхностного слоя вулканизированной резины с целью увеличения гидрофобности и лиофобности поверхности.

В ходе работы были получены смеси, сопоставимые по техническим характеристикам с существующими на рынке аналогами. Проводится их модификация для получения заданных свойств.

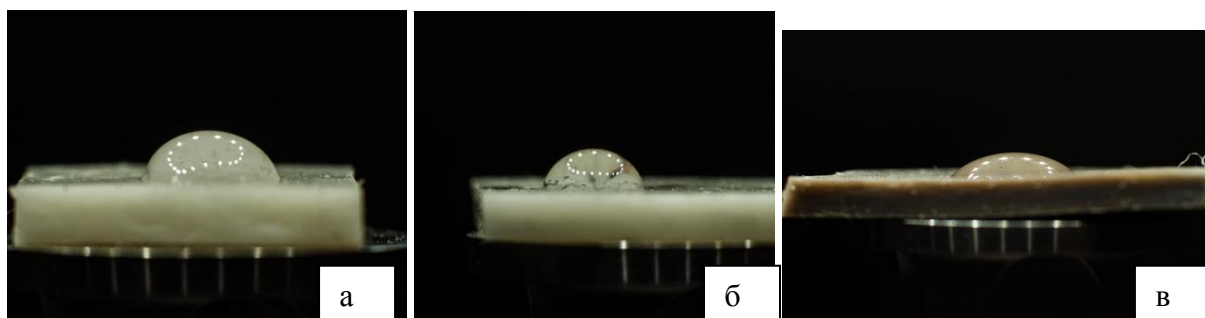


Рис.1. а) Капля воды на поверхности исходной резиновой композиции; б) капля воды на поверхности резиновой композиции с модифицированной поверхностью; в) капля воды на поверхности резиновой композиции с бактерицидной добавкой.

ВЛИЯНИЕ “in situ” ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Al-Sn

Скоренцев А.Л., Русин Н.М.

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Антифрикционные двухфазные сплавы Al-Sn способны к самосмазыванию при сухом и граничном трении [1], и эффективность образующейся антизадирной пленки определяется количеством выдавленного на поверхность трения олова и степенью её покрытия, т.е., по сути, составом и структурой композиционного материала (КМ) вблизи поверхности трения. Данными параметрами КМ Al-Sn можно управлять, причём не только на стадии их получения, но и ввиду высокой пластичности второй фазы – посредством дальнейшей *in situ* обработки композитов.

Например, в качестве метода обработки можно использовать равноканальное угловое прессование (РКУП) [2], благоприятно отличающееся от обычных методов обработки тем, что позволяет подвергать образцы неограниченным суммарным деформациям с сохранением их исходных размеров, а также эффективно управлять размерами и формой включений в КМ, задавая определённый маршрут прессования. В процессе интенсивного пластического формоизменения включений второй фазы изменяются не только макроскопические параметры структуры (среднее межчастичное расстояние, площадь межфазной поверхности КМ), но происходит деформационное и субструктурное упрочнение Al матрицы. Целью настоящей работы была попытка разграничить степень влияния макроскопических и микроскопических параметров структуры на механические свойства КМ Al-Sn.

Для этого спеченные образцы с различной объемной долей второй фазы были подвергнуты обработке методом РКУП с использованием маршрутов А и С. В первом случае (РКУП(А)) поступательно формировалась слоистая структура, где плоские включения олова были разделены тонкими прослойками Al матрицы, тогда как при РКУП(С) каждое четное прессование приводило к восстановлению формы включений Sn и увеличению расстояния между ними.

Тест на сжатие не выявил существенной зависимости прочностных свойств равнодеформированных КМ от типа формирующейся в них макроструктуры. Так, прочность обработанных методом РКУП(А) образцов независимо от их состава возрастала скачком после первого прессования и затем плавно повышалась по мере увеличения числа проходов. В случае РКУП(С) прочности КМ после второго прохода переставала расти. При этом разность в прочности 4-кратно прессованных образцов маршрутом А и С составляла не более 10 МПа.

Таким образом, несмотря на большую разность межфазной поверхности в КМ после нескольких проходов и её непроницаемость для решёточных дислокаций, прочностные свойства КМ при заданном составе и равной величине испытанной деформации близки. Определяющим прочностные свойства КМ Al-Sn фактором является размер субзерен в алюминиевой матрице, средняя величина которого быстро достигает равновесного значения и далее не меняется, независимо от выбранного маршрута РКУП.

Литература:

1. Буше Н.А. и др. Подшипники из алюминиевых сплавов. – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.
2. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ СЛОИСТЫХ СРЕД

Соляев Ю.О.¹, Нгуен К.², Харченко К.Д.², Саганов Д.Б.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

В работе рассматривается стационарная задача градиентной теории термоупругости для слоистых композитных структур. Приведена постановка задачи плоской деформации градиентной термоупругости. Указан алгоритм решения задачи при равномерном нагружении в плоскости слоя (равномерный температурный нагрев). Получена постановка контактной задачи для многослойных композитных структур. Показано, что использование модели градиентной термоупругости, обеспечивающей непрерывность деформаций в контактных зонах, позволяет учесть неклассические эффекты, связанные с локализацией напряжений в зоне контакта. В результате, градиентная теория упругости прогнозирует возникновение дополнительных локальных растягивающих напряжений в слое с меньшим коэффициентом температурного расширения. Полученное решение является естественным обобщением решения классической термоупругости и позволяет учесть влияние масштабных параметров структуры при оценке напряженно-деформированного состояния.

Решены тестовые задачи для случая градиентного нагрева однослойной и двуслойной структуры. Распределение температурного поля в слоях определялось на основе классической модели теплопроводности. Показано, что модель градиентной термоупругости позволяет учесть неклассическую зависимость напряжений и деформаций в слоях различной толщины при заданном одинаковом градиенте температурного поля. Показано, что возникающий эффект является эффектом «усиления»: при уменьшении толщины слоя деформации и интенсивность напряжений в нем уменьшаются, поэтому материал будет проявлять себя, как материал с более высоким «эффективным» модулем упругости и пределом текучести. При этом для слоев, толщина которых много больше масштабного параметра материала, справедлива классическая модель термоупругости, но для более тонких слоев возникают локальные напряжения вблизи границ.

Показано, что для двухслойной структуры градиентная теория упругости прогнозирует возникновение дополнительных локальных растягивающих напряжений в слое с меньшим коэффициентом температурного расширения. На основе сравнения с решением аналогичной задачи в системе Ansys и классического аналитического решения, показано, что полученное градиентное решение является обобщающим для классической задачи термоупругости и позволяет учесть влияние толщины слоев и масштабных параметров материалов на напряженно-деформированное состояние слоистой структуры.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №12-01-00273,
№12-01-31220-мол-а и гранта Президента РФ МК-5101.2013.8.*

НАНОДИСПЕРСНЫЙ МИНЕРАЛ ШУНГИТ КАК НОВЫЙ УПРОЧНЯЮЩИЙ НАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАУЧУКОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Чиркунова С.В., Яновский Ю.Г., Корнев Ю.В., Бойко О.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

В настоящее время одним из направлений развития техники и технологий является разработка полимерных/эластомерных композитов, наполненных наноматериалами различной природы и структуры, обладающих улучшенными характеристиками. Данные наполнители являются усиливающими (активными) и вносят наибольший вклад в формирование эксплуатационных и конструкционных свойств композитов за счет образования значительной площади контакта их поверхности с эластомерной матрицей. Таким образом, важной задачей является получение новых типов наноматериалов, направленных на улучшение экономических и экологических показателей при производстве, обеспечение высоких эксплуатационных характеристик эластомерных композитов, а также придания им новых специальных свойств. Определённый интерес представляет природный композиционный минерал шунгит, состоящий из силикатных частиц (60%) и аморфного шунгитового углерода (30%) с примесью неорганических веществ, обладающий низкой стоимостью и высокой экологической безопасностью. Ранее исследовалось действие измельчённого до наноразмеров (по оригинальной технологии, разработанной в ИПРИМ РАН) минерала шунгит в эластомерных материалах на основе карбоцепного каучука СКС-30 АРК [1]. Было установлено, что увеличение степени дисперсности минерала шунгит заметно повышает комплекс механических свойств данных материалов.

Учитывая такую особенность поверхности минерала шунгит как бифункциональность, интересно было исследовать его действие в эластомерных материалах на основе гетероцепных каучуков, а также каучуков специального назначения. В ходе экспериментов было установлено, что с увеличением степени дисперсности минерала шунгит происходит значительное повышение прочности (в 2 раза и более), значения напряжения при удлинении и сопротивления раздиру для эластомерных композитов как на основе каучука СКТН-А, так и для каучука БНКС-28АМН. Данные, полученные на измерительном комплексе NanoTest600, подтверждают увеличение усиливающей способности нанодисперсного минерала шунгит в сравнении с тонкодисперсным минералом шунгит в вулканизатах на основе СКТН-А и БНКС-28АМН, а также показывают, что эластомерный композит, наполненный измельченным шунгитом, более однороден структурно в сравнении с образцом, наполненным исходным шунгитом.

Литература:

1. Корнев Ю.В., Яновский Ю.Г., Бойко О.В., Семёнов Н.А., Юмашев О.Б., Николаева С.В. // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2011. – №4. – С.36-40.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С КОМПОЗИТНЫМИ НЕСУЩИМИ СЛОЯМИ И ЛЕГКИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Шишкин В.М., Левашов А.П.

Вятский Государственный Университет, г. Киров

В настоящее время для изготовления узлов и агрегатов конструкций летательных аппаратов широко используются трехслойные материалы с композитными несущими слоями и легким заполнителем. Такие материалы кроме высокой удельной прочности обладают еще и весьма высокими демпфирующими свойствами, что снижает динамическую напряженность элементов конструкции при колебаниях в резонансной зоне. В качестве конструкции рассматривается трехслойная пластина с композитными несущими слоями и ортотропным легким заполнителем. Показателем демпфирующих свойств пластины является логарифмический декремент колебаний при резонансе на низшей собственной частоте.

Для моделирования пластины предлагается треугольный трехслойный конечный элемент повышенной точности с шестью узлами, расположенными в срединной поверхности нижнего несущего слоя. Независимыми параметрами являются линейные перемещения узлов и углы поворота поперечных сечений заполнителя. Материал несущих слоев элемента – многослойный композит, армированный однонаправленными волокнами. Напряженное состояние данных слоев считается плоским. Заполнитель работает на поперечный сдвиг и считается несжимаемым, что соответствует модели Тимошенко и общепринятым представлениям о работе трехслойных конструкций. Материал несущих слоев и заполнителя считается вязкоупругим. Демпфирующие свойства однонаправленно армированного композитного слоя определяются логарифмическими декрементами колебаний $\delta_1, \delta_2, \delta_{12}$ при деформировании его соответственно вдоль волокон, поперек волокон и при сдвиге в плоскости слоя. Для заполнителя задаются логарифмические декременты колебаний δ_{xz}, δ_{yz} при поперечном сдвиге в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Получены матрица жесткости, матрица масс, матрица вязкого демпфирования и вектор внешних узловых сил предлагаемого конечного элемента. Построена система разрешающих уравнений для определения динамической реакции пластины при колебаниях в резонансной зоне. Проведена свертка отмеченной системы к синфазной и ортофазной (относительно вектора нагрузки) составляющей амплитуды низшей формы колебаний пластины. Логарифмический декремент пластины по отмеченной форме колебаний определяется выражением $\delta = \pi/\lambda$, где λ – коэффициент динамичности при резонансе. Проведены численные эксперименты по оценке демпфирующих свойств и динамической реакции консольной трехслойной пластины при действии поверхностной нагрузки $q = q_0 \cos pt$ с амплитудой q_0 и частотой $p = \omega_1$, где ω_1 – низшая собственная частота колебаний пластины. Проверено выполнение равенства рассеянной энергии в материале работе эквивалентных внешних узловых сил за один цикл колебаний пластины

КОЛЕБАНИЯ СОСТАВНЫХ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ С КОЛЬЦЕВЫМИ ШПАНГОУТАМИ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ

Шклярчук Ф.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Рассматривается составная ортотропная оболочка вращения с кольцевыми соединительными шпангоутами, частично заполненная идеальной несжимаемой жидкостью, свободная поверхность которой в невозмущенном состоянии перпендикулярна оси оболочки. Для расчета несвязанных между собой осесимметричных (продольно-радиальных, $n=0$) и неосесимметричных ($n=1,2,3,\dots$) гидроупругих колебаний осесимметричной системы (n – число волн в окружном направлении) разработан новый вариант метода конечных элементов (МКЭ) в перемещениях.

В качестве КЭ рассматриваются узкие конические полоски оболочки, а также шпангоуты с недеформируемым поперечным сечением. Тангенциальные перемещения оболочки в пределах ширины кольцевой полоски КЭ аппроксимируются линейными функциями, а нормальные перемещения – полным кубическим полиномом. В качестве обобщенных координат рассматриваются амплитудные значения для n -ой гармоники осевого, радиального и окружного перемещений (при $n=0$ последнее равно нулю), а также угла поворота в меридиональной плоскости на краях КЭ оболочки и на некоторой окружности шпангоута. Кинематические условия соединения края КЭ оболочки и шпангоута записываются с учетом их эксцентриситетов.

Перемещения жидкости, на основании точного аналитического решения уравнения неразрывности с граничным условием безотрывности на поверхности оболочки и уравнений движения в радиальном и окружном направлениях, выражаются через одну неизвестную функцию двух переменных, представляющую осевое перемещение жидкости. Эта функция в пределах тонкого слоя аппроксимируется асимптотически «подходящей» функцией радиальной координаты и линейной функцией осевой координаты. Таким образом, обеспечивается высокая точность решения гидродинамической задачи в тонком слое при использовании всего одной аппроксимирующей с двумя обобщенными координатами, представляющими осевые перемещения жидкости на торцах слоя.

Путем суммирования по всем КЭ оболочек, шпангоутам и слоям жидкости с учетом их сопряжения получаются выражения потенциальной и кинетической энергии системы в обобщенных координатах. Потенциальная энергия не зависит от обобщенных координат внутренних давлений жидкости и они, как циклические координаты, исключаются. В результате взаимодействие жидкости с оболочкой представляется матрицей присоединенных масс жидкости для обобщенных координат КЭ-модели оболочки.

Рассмотрены примеры расчета собственных осесимметричных и неосесимметричных колебаний различных оболочек вращения с жидкостью со сравнениями результатов с известными точными, численными и экспериментальными результатами. Выполнены оценки влияния различных параметров, в частности – формы поперечных сечений соединительных шпангоутов.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ КАБЕЛЕ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Nb-Ti

Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Мальцев Ю.А.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, г. Северск*

Работа посвящена на анализ влияния холодной деформации волочением на структуру многожильного сверхпроводника на основе сплава Nb-Ti на промежуточной стадии производства при переходе Ø1,3-Ø1,2 мм. В работе рассматривается состав и структура кабеля с использованием оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопий.

При анализе влияния деформации волочением на структуру многожильного сверхпроводника на основе сплава Nb-Ti обнаружены следующие особенности:

- в месте обрыва проводника выявлены зоны локализации деформации, в которых близлежащие волокна Nb-Ti имеют неправильную форму;
- обнаружено изменение размеров и формы волокон Nb-Ti в промежуточном слое в бездефектной области; на границе с медным сердечником волокна имеют округлую форму со средним диаметром ~ 10 мкм, на границе с медной оболочкой волокна имеют ромбическую форму с диагоналями ~ 13 и 11 мкм;
- в результате интенсивной пластической деформации медь в элементах кабеля приобретает субмикроструктурную структуру со средним размером: в сердечнике ~800 нм, в промежуточном слое между волокнами в матрице ~800 нм, в месте обрыва проводника в промежуточном слое между волокнами в матрице ~850 нм, в оболочке ~1050 нм;
- выявлен диффузионный Nb барьер вокруг волокон Nb-Ti, размещенных в медной матрице, шириной ~ 250 нм в бездефектной области и в зоне локализации пластической деформации;
- наблюдалось изменение формы и химического состава волокон Nb-Ti в промежуточном слое: в бездефектной области все волокна Nb-Ti имеют округлую форму и состав 35,66 ат.% Nb и 63,07 ат.% Ti, в области обрыва проводника волокна имеют правильную форму и химический состав 35,57 ат.% Nb и 63,33 ат.% Ti.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ, проект 11-08-00237-а.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ «ПОДЛОЖКА - ПОКРЫТИЕ»

Якупов С.Н., Якупов Н.М.

*ФГБУН Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН,
г. Казань*

Поверхностные покрытия, обладая определенными заданными свойствами, позволяют решать множество различных проблем надежности, долговечности и безопасности конструкций и сооружений. Они обеспечивают защиту и изоляцию поверхности изделий, работающих в различных средах и под воздействием различных физических полей. Благодаря покрытиям удастся достигать необходимые характеристики трения для соприкасающихся деталей и т.д. Создание покрытий с заданными свойствами – это одно из перспективных направлений.

В первой части работы на базе двумерного подхода продолжены работы по экспериментально – теоретическому исследованию механических свойств пленочных материалов с нанопокрытием. Раздельно экспериментально исследуются свойства подложки и пакета «подложка - покрытие». При обработке данных используются соотношения нелинейной теории оболочек. Рассмотрены новые три группы образцов из полиэтилентерефталата с нанопокрытием из оксида титана TiO_2 . Прогибы образцов при наличии покрытия снижаются, при этом жесткость на растяжение композиции «подложка - покрытие» возрастает более чем в 1,7 раза по сравнению с жесткостью образца без покрытия, а жесткость композиций при возрастании толщины покрытия в 3 раза возрастает в 1,5 раза. Разработка награждена Серебряной медалью на XIX Международной выставке-конгрессе «Hi-Tech - 2013», г. Санкт - Петербург.

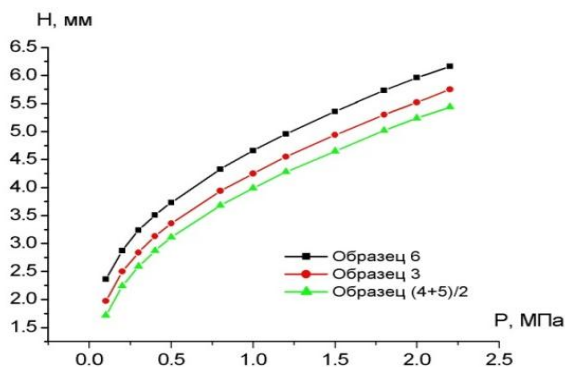


Рис.2 Серебряная медаль
«Hi-Tech - 2013»

Рис.1 Кривые «прогиб - давление»
образец 3 – покрытие 50 нм, образцы 4 и 5 –
покрытие 150 нм, образец 6 – без покрытия

Вторая часть работы посвящена исследованию адгезии пленки к плоской и сферической подложке. Определение адгезии к подложке на базе существующих измерителей адгезии не всегда эффективны, трудно обеспечить идентичность замеров в процессе изучения влияния среды, деформации поверхности и физических полей. В связи с этим возникает необходимость создания инструмента для исследования адгезии. Разработан двумерный экспериментально - теоретический подход определения адгезии пленки к плоской и сферической подложке, устройство для испытания и выполнен цикл исследований. Подход позволяет повысить точность определения адгезии и снизить разброс получаемых результатов.

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН №25.

Секция 2

Аэро-, гидромеханика и реология структурно сложных сред

О ДВИЖЕНИИ ЧАСТИЦ В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЕ

Батищева Я.Г.¹, Веденяпин В.В.¹, Мелихов И.В.²

¹ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва

²Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Со времен Эйлера задача о движении твердого тела является классической, и для нее находятся все новые и новые приложения. Мы рассматриваем задачу о движении твердого тела в газе, когда оно с ним реагирует неоднородно по поверхности. Такое рассмотрение приводит к математическим моделям многих явлений - движения аэрозолей, горения, фотофореза и других видов «форезов»: магнитофореза, электрофореза. Фотофорезом называется движение частиц под действием света [1-4,10]. Будет предложена математическая модель всего этого круга явлений [5-10].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 11-01-112.

Литература:

1. Ehrenhaft F. // Ann.Phys. – 1918. – Bd 55. – S. 81-132.
2. Максвелл Д.К. О напряжениях в разреженном газе, возникающих вследствие неоднородностей температуры / В кн. Труды по кинетической теории. – М.: Бином, 2011. – С.266-299.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.
4. Яламов Ю.И., Хасанов А.С. Фотофорез гетерогенных по теплопроводности крупных аэрозольных частиц // Журнал технической физики. – 1998. – Т.68. – №4.
5. Мелихов И.В., Симонов Е.Ф., Божевольнов В.Е., Веденяпин В.В... Хемореактивное движение твердых тел, реагирующих с газом. – М.: Книжный дом Университет, 2006.
6. Веденяпин В.В., Батищева Я.Г., Мелихов И.В., Горбачевский А.Я. О движении твердого тела в газе с неоднородными поверхностными процессами // Математическое моделирование. – 2003. – Т.15. – С.6.
7. Батищева Я.Г. О движении твердого тела в газе, сорбирующемся на его поверхности. / Диссертация к.ф.-м.н. – Москва, 2004.
8. Веденяпин В.В., Батищева Я.Г., Мелихов И.В., Горбачевский А.Я. О движении твердого тела в химически активной среде // Доклады Академии наук. – 2003. – Т.392. – С.758.
9. Батищева Я.Г. К выводу уравнений динамики твердого тела в газе, реагирующим с ним неоднородно по поверхности // Доклады Академии наук. – 2003. – Т.392. – С.631.
10. Веденяпин В.В. Фотофорез и реактивные силы // Математическое моделирование. – 2006. – Т.18. – №8. – С.57-66.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ ЧАСТИЦ

Бедарев И.А., Федоров А.В.

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

Для построения математических моделей механики гетерогенных сред важно знать интегральные характеристики взаимодействия газовой фазы и частиц, составляющих твердую фазу. При прохождении ударной волны через облако частиц такие интегральные характеристики, как сопротивление частицы, теплообмен с окружающей средой будут зависеть от того, является ли скорость обтекания до- или сверхзвуковой. Режим обтекания частиц будет зависеть от того, сформировался ли коллективный скачок перед облаком частиц или частицы обтекаются индивидуально. Как известно, в зависимости от скорости сверхзвукового потока и расстояния между сферами перед телами может образоваться коллективная ударная волна или волновая структура с Маховским или регулярным взаимодействием. Кроме того, на коэффициент сопротивления и теплообмен будет влиять взаимное расположение частиц, например, если одна частица находится в аэродинамической тени другой частицы.

Целью работы было изучение взаимодействия проходящей ударной волны с системой неподвижных тел, исследование ее различных режимов обтекания сверхзвуковым потоком за проходящей ударной волной и изучение влияния на коэффициент сопротивления расположения частиц. Моделирование выполнено в расчетном пакете ANSYS Fluent. Использована математическая модель осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненная SST модификацией $k-\omega$ модели турбулентности. Расчет проводился в двумерной осесимметричной и трехмерной постановках.

Определено влияние на коэффициент сопротивления частиц расстояния между ними, если одна располагается в аэродинамической тени другой. Получены значения расстояний между частицами, а значит объемные концентрации, при которых взаимное влияние частиц исчезает.

Показано, что при увеличении расстояния между телами при поперечном расположении частиц, происходит переход от коллективного обтекания частиц к индивидуальному, вначале с Маховским, а затем и с регулярным взаимодействием между ударными волнами.

Получена волновая картина взаимодействия проходящей ударной волны с поперечно и продольно расположенными сферами в различные моменты времени. Для описания переходов от одного типа течения к другому построена карта режимов обтекания системы поперечных цилиндров и системы сфер в зависимости от числа Маха и расстояния между телами. Сравнение расчетов с экспериментальными данными ИТПМ СО РАН по режимам ударно-волнового взаимодействия показало хорошее соответствие.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.В37.21.0645, РФФИ – № 12-08-00311-а, 11-08-00144-а, Президиума РАН.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ В ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

Бошенятов Б.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Дан обзор научных исследований, выполненных небольшим коллективом сотрудников ИПРИМ РАН в период с 2009-13 гг. Исследования проводились комплексным методом: все эксперименты сопоставлялись с данными численного моделирования, на основе полных уравнений Навье-Стокса. Наблюдается очень хорошее совпадение экспериментальных и численных результатов. Обсуждаются трудности моделирования волн цунами в лабораторных условиях и возможные пути их решения. Показано, что в ряде случаев воспроизводить в установке натурные значения критериев подобия нет необходимости, так как имеет место автомодельность или независимость процессов от величины этих критериев. В частности, скорость распространения волн типа цунами в гидродинамическом лотке и при значениях параметра нелинейности $0.02 < A/H < 0.1$ (где A – амплитуда волны, H – глубина воды в лотке), как и в натуральных условиях при $A/H=0.0001$, описывается формулой $c = \sqrt{gH}$. Получены новые результаты в изучении процессов взаимодействия волн типа цунами с тонкими (по сравнению с длиной волны) подводными преградами. Показано, что амплитуда отраженной волны определяется, главным образом нелинейными эффектами и оценка коэффициентов отражения волн цунами на основе линейной теории является сильно заниженной. В то время как, амплитуда и энергия проходящей волны зависит и от нелинейных, и от вязких эффектов. В ряде случаев, вязкость приводит к качественно отличной картине течения за преградой с образованием крупномасштабных вихревых структур, локализованных вблизи подводной преграды. Эти явления имеют не только чисто научный интерес, но и важное практическое значение, так как открывают новые возможности создания в будущем эффективных подводных преград для волн цунами, снижающих их разрушительную силу.

Литература:

1. Бошенятов Б.В., Попов В.В., Левин Ю.К., Левин К.Ю., Семянистый А.В., Яновский Ю.Г. Моделирование волн типа цунами в лабораторных условиях / Всероссийская конференция «Механика композиционных материалов и конструкций, структурно-сложных и гетерогенных сред». Сборник трудов. – М.: ИПРИМ РАН, 2010. – С.51-60.
2. Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В. / Патент РФ на изобретение № 2485452. Устройство измерения уровня воды. Заявка № 2010141060. Приоритет 07.10.2010. Зарегистр. 20.06.2013.
3. Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В., Семянистый А.В. Метод измерения волн малой амплитуды на водной поверхности // ПТЭ. – 2011. – №2. – С.116-117.
4. Бошенятов Б.В., Попов В.В. Экспериментальные исследования взаимодействия волн типа цунами с подводными преградами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т.55. – №9/3. – С.145-150.
5. Бошенятов Б.В. О подавлении волн цунами подводными преградами // ДАН. – 2013. – Т.452. – №4. – С.392-395.

СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ С ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В НИХ НАНОЧАСТИЦ

Валиев Х.Х.¹, Снегирева Н.С.¹, Науменко В.Ю.²

¹*ФБГУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И.Пирогова, г. Москва*

Среди композиционных материалов одно из важных мест занимают биологически активные композиционные материалы. К ним относятся материалы, состоящие из пористой полимерной основы, в которой находятся либо иммобилизованные препараты (например, лекарственные препараты), либо движущиеся реагенты, например антитела и антигены (иммунохроматографические тест-полоски). При конструировании биосенсоров представляет большой интерес вопрос об оптимизации выбора материалов, участвующих в их работе. При этом необходимо решать множество взаимосвязанных задач биомеханики. К ним относится анализ прочности пористых мембран, выбор оптимальных по диаметру пор заготовок, состоящих из основы и соединенной с ней мембраной, определение эффективности и скорости движения аналита и прочих характеристик. При моделировании биологических и физиологических процессов, например в ходе разработки методов диагностики, задача усложняется, возникает необходимость прогнозирования возможности движения наночастиц в сложном капиллярном пространстве живой ткани с контролем их размеров. При подготовке партий таких наночастиц должна быть обеспечена их определенная концентрация, высокая чувствительность вместе с достаточно высокой скоростью продвижения в сложном по структуре материале. Здесь важно также установление вероятности агломерации наночастиц.

В работе использованы мембраны "Владипор" с эффективными диаметрами пор 0,20 мкм и 0,45 мкм, как модели наиболее близких по размеру значений диаметров протоков в тканях животных. Проведен анализ связи прочностных свойств образцов этих полимерных пленок со структурой их поверхности и скоростью перемещения в них коллоидных растворов наночастиц магнетита. Испытание физико-механических свойств мембран проводили на универсальной разрывной машине UTS – 10 (Ulm, Германия). Топография поверхности этих мембран исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа easyScan (Nanosurf, Швейцария), работавшего в контактном режиме на воздухе при комнатной температуре. Скорость движения наночастиц наблюдали с помощью разработанной в ИПРИМ установки.

Полученные результаты важны для установления корреляции структуры пор поверхности полиамидных мембран "Владипор" с их физико-механическими свойствами и с особенностями распределения движущихся наночастиц магнетита при моделировании биологических и физиологических процессов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Говоров А.А., Мартиросов М.И.

*Московский авиационный институт (научно-исследовательский университет),
г. Москва*

Важным этапом в создании перспективного авиационного двигателя является проектирование лопаток сложной геометрической формы с улучшенными газодинамическими параметрами и увеличенным КПД. Предсказание опасных аэроупругих явлений обеспечит уменьшение времени на проектирование и увеличит надежность при испытаниях и эксплуатации. В данной работе рассмотрено такое опасное явление как флаттер рабочего колеса. Поскольку геометрическая форма лопаток усложняется при газодинамической оптимизации, то аналитические расчеты не представляется возможным выполнить и приходится прибегать к коммерческим продуктам численного моделирования. Однако основные зависимости данного автоколебательного процесса могут быть получены и на аналитических моделях.

В качестве частного случая рассматривается явление дозвукового срывного флаттера. На первом этапе для качественной оценки зависимости частот колебаний от сдвига фаз строится математическая модель на основе связанной системы «диск-лопатки» в виде плоского цилиндрического разреза лопаточного венца. Профили лопаток считаются жесткими, а упругие свойства моделируются элементами в виде пружин соответствующей жесткости. Полученная математическая модель представляет собой систему конечно-разностных уравнений второго порядка.

Далее рассматривается нестационарное взаимодействие рабочего колеса с потоком газа и оценивается вклад работы каждой составляющей колебания. Показан существенный вклад изгибно-крутильной связанности форм. Данный результат может расцениваться как один из критериев возникновения автоколебаний. Для моделирования газодинамической нагрузки использовались аэродинамические коэффициенты влияния (АКВ).

Для определения динамических характеристик моделей лопаток, имеющих сложную трехмерную геометрическую форму, используется коммерческий пакет для конечно-элементного моделирования. Он позволяет определить собственные формы и частоты колебаний, а в дальнейшем увидеть сближение изгибной и крутильной форм и использовать это как критерий возникновения флаттера. В этом случае показательным является построение диаграммы Кэмпбелла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и РФФИ (код проекта 11-01-00540_a и 12-01-00566_a).

ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ РАЗБАВЛЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Гуськов О.Б.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Рассмотрены задачи о движении сферических тел произвольного размера с заданной скоростью в разбавленной суспензии и газовой эмульсии в приближении Стокса для несущей сплошной среды. Получены выражения для силы сопротивления тел в первом приближении по объемной концентрации дисперсной фазы. На основе полученных решений найдены выражения для эффективной вязкости суспензии и эмульсии для задач о движении сферических тел сквозь дисперсную среду. Показано, что коэффициент при объемной концентрации в формуле для эффективной вязкости дисперсной среды зависит от отношения размеров дисперсных частиц и тела. В пределе, когда это отношение стремится к нулю, полученные коэффициенты совпадают с результатом Эйнштейна для эффективной вязкости суспензии и результатом Тейлора для вязкости газовой эмульсии. Однако, для не «точечных» дисперсных частиц эти коэффициенты могут существенно отличаться от классических результатов Эйнштейна и Тейлора. Показано также, что коэффициент при объемной концентрации в формуле для эффективной вязкости дисперсной среды зависит не только от размера тела, но и от характера граничных условий на его поверхности. На основе полученных результатов сделан вывод о том, что дисперсная среда, строго говоря, не соответствует понятию ньютоновской сплошной среды.

К ГИДРОМЕХАНИКЕ СТРУКТУРНЫХ СРЕД В КОЛЛЕКТОРЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Исмаилов Р.Ш., Гахраманов П.Ф., Исмаилова Ш.Г., Гулиев Э.Ф.

Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан

Структурные среды образуют чрезвычайно широкий класс разнообразных систем (дисперсные системы - глинистые и цементные растворы, некоторые смазочные масла, парафинистые нефти, разнообразные коллоидные растворы, суспензии и т.д. – относятся к структурным средам), единственными общими свойствами которых являются их текучесть и отклонение от закона вязкостного трения Ньютона. Поскольку размеры дисперсных частиц в среде очень малы по сравнению с размерами коллектора (трубы, канала), содержащего суспензию, можно в некотором смысле рассматривать дисперсную систему как сплошную среду.

При математическом описании движения структурных сред в коллекторе (трубе, канале) с проницаемыми стенками (система не является изолированной) законы сохранения записываются в виде уравнений баланса, связывающих скорость изменения «полного количества» соответствующей физической величины в некотором объеме с потоком этой величины через поверхность, ограничивающую объем, и «источниками», действующими внутри объема. Тогда для среды в целом можно записать следующие уравнения баланса массы, импульса и энергии в интегральной форме:

$$\int_v \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_s \rho u_n ds + \int_v q_* dV, \quad (1)$$

$$\int_v \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) dV = - \int_s (\rho \vec{u} u_n + \vec{\sigma}_n) ds + \int_v (\rho \vec{F} + \vec{u}_* q_*) dV, \quad (2)$$

$$\int_v \frac{\partial E}{\partial t} dV = - \int_s (\rho E u_n - \vec{u} \vec{\sigma}_n + \vec{q}_n^*) ds + \int_v (\rho \vec{u} \vec{F} + E_* q_*) dV, \quad (3)$$

где $E = e + u^2/2$; $E_* = e_* + u_*^2/2$; ρ, u - плотность и скорость среды; $\vec{F}, \vec{\sigma}$ - вектор внешних массовых и поверхностных сил; e, e_* - внутренняя энергия основной и изменяющей массы; q_* - интенсивность изменения массы; u_* - скорость изменяющей массы; $\vec{q}_*$ - вектор теплового потока.

В области непрерывных движений из (1)-(3) после соответствующих преобразований получены дифференциальные уравнения переноса массы, импульса и энергии. В этих уравнениях учтены внешние источники (стоки) массы, импульса и энергии через проницаемые стенки коллектора.

Полученные уравнения справедливы при описании среды в целом с любыми физическими свойствами. Для ее замыкания необходимо привлечь термодинамические и реологические уравнения состояния, а также выражения для теплового потока. Эти определяющие соотношения устанавливаются при построении математической модели конкретной изучаемой среды. В частности получены уравнения движения для вязкопластичной среды, одномерного течения в коллекторе с проницаемыми стенками и их решения.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОАГУЛЯЦИЮ НАНОРАЗМЕРНЫХ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ

Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Снижение электрокинетического потенциала коллоидных частиц (увеличение скорости коагуляции) в магнитном поле, является механизмом, определяющим снижение накипи в теплообменных трубах [1]. Данный эффект количественно впервые теоретически был исследован в работе [2], где рассматривались коллоидные частицы микронных размеров, при этом зона влияния двойного электрического слоя, определяемая длиной Дебая, имела размеры порядка нескольких нанометров. В этих условиях имелась возможность упрощенного анализа – в приближении теории плоского двойного слоя. Там же были получены формулы, связывающие изменение электрокинетического потенциала с параметром магнитного аппарата $Bv\tau$ (B – индукция магнитного поля, v – скорость течения воды, τ – время нахождения воды в магнитном поле). Однако при рассмотрении наноразмерных коллоидных частиц со сферической симметрией электростатического поля приближение однородного поля неприемлемо. В нашей работе теория Гамаюнова была модифицирована для случая наноразмерных зародышевых кристаллов. Численное решение полученных уравнений позволило получить явные выражения для зависимости скорости коагуляции от параметров магнитного аппарата, скорости и характеристик водного потока. Сравнение наших результатов с расчетами по методике [2] показало, что при наномасштабном анализе устойчивости коллоидного раствора действительно необходим учет реальной неоднородности электрического поля вблизи коллоидных частиц, поскольку упрощенный анализ в предположении однородности поля приводит к большой погрешности – существенно занижает оценки барьера отталкивания и коэффициента замедления W (особенно при больших потенциалах ψ_d) после магнитной обработки. Таким образом, уточненный расчет приводит к меньшей интенсивности коагуляции частиц в коллоидном растворе после омагничивания водного потока.

Полученные результаты позволят уточнить механизм магнитной обработки воды и приблизить к реальным значениям оценку противонакипной эффективности на его основе.

Литература:

1. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Механизм снижения накипи при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах // Теплоэнергетика. – 2013. – №3. – С.74-77.
2. Гамаюнов Н.И. Воздействие постоянного магнитного поля на движущиеся растворы и суспензии // Коллоидный журнал. – 1994. – Т.56. – №2. – С.290-298.

ОСОБЕННОСТИ МАССОПЕРЕНОСА В ПЕРЕСЫЩЕННОМ РАСТВОРЕ ПРИ ЕГО МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Механизм магнитной обработки воды (МОВ), полученный при анализе эксперимента [1], представлен математической моделью [2,3], которая в данной работе уточнена с учетом константы Толмена δ , а также существенно большего коэффициента массопереноса растворенных солей накипеобразователя на взвесь, чем на стенки трубы.

Показано, что коэффициент снижения накипи Θ при МОВ пропорционален отношению коэффициентов массопереноса молекул растворенных солей накипи на частицы второго порядка коагуляции $\beta_{кч,2}$ и на стенки трубы $\beta_{тр}$: $\Theta \sim \beta_{кч,2}/\beta_{тр}$.

Зависимость отношения коэффициентов массопереноса $\beta_{кч,2}/\beta_{ст}$ от безразмерного параметра Толмена $\delta/r_{кп0}$ приведена на рис.1. Отметим, что значение $\beta_{кч,2}/\beta_{тр} > 2 \cdot 10^4$ можно пояснить геометрическим соотношением средних расстояний молекулы CaCO_3 до стенки трубы ($\approx 10^{-2}$ м) и до ближайшего зародыша ($\approx 10^{-6}$ м).

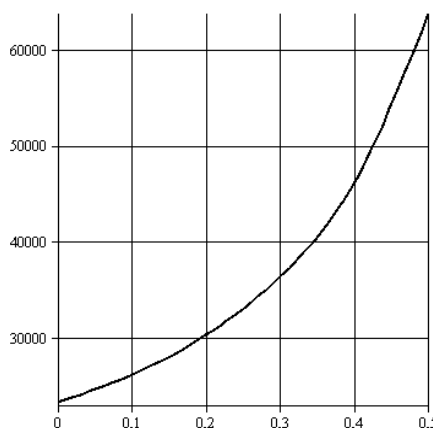


Рис.1. Зависимость отношения коэффициентов массопереноса $\beta_{кч,2}/\beta_{ст}$ от безразмерного параметра Толмена $\delta/r_{кп0}$ в условиях эксперимента [1].

Сделанные уточнения повысят адекватность отображения реальных физических процессов математической моделью и расширят область практического применения МОВ.

Литература:

1. Szkatula A., Balanda M., Kopec M. Magnetic treatment of industrial water. Silica activation // The Europ. Phys. J., Appl. Phys. – 2002. – Vol.18. – P.41-49.
2. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Влияние коагуляции коллоидных частиц на снижение накипеобразования при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах// Теплоэнергетика. – 2011. – №7. – С.13-16.
3. Кошоридзе С.И., Левин Ю.К. Механизм снижения накипи при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах // Теплоэнергетика. – 2013. – №3. – С.74-77.

ОБЪЕМНАЯ ВЯЗКОСТЬ МИКРОПУЗЫРЬКОВОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СРЕДЫ

Левин Ю.К., Попов В.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Рассмотрена задача о нахождении первого и второго эффективных коэффициентов вязкости пузырьковой среды с микроскопическими размерами газовых пузырей, моделируемой сплошной материальной средой с эффективными гидродинамическими параметрами, подлежащими определению. Используя имеющиеся экспериментальные данные по поглощению звука низких (по сравнению с резонансной частотой пузырей) частот микропузырьковой средой и данные по измерению коэффициента гидравлического сопротивления гладких горизонтально расположенных труб микропузырьковому потоку, показано, что второй коэффициент вязкости такой среды (объемная вязкость) на порядки превышает ее сдвиговую вязкость. Приводится формула для расчета эффективного объемного коэффициента вязкости микропузырьковой газожидкостной среды. Проводится сравнение с экспериментами по поглощению звука низких частот в водо–воздушной и водо–гелиевой средах при объемных газосодержаниях в несколько процентов.

РЕОЛОГИЯ СЛАНЦЕВ: ТРАНСПОРТ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В НАНОПОРАХ КЕРОГЕНА

Саваторова В.Л.¹, Талонов А.В.¹, Власов А.Н.², Волков-Богородский Д.Б.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

В данной работе исследуется транспорт газовой фазы в керогене, который рассматривается как гетерогенный материал с периодической структурой нанопор.

Задача рассматривается в трёхмерной постановке, где все характерные величины являются функциями координаты $x = \{x_1, x_2, x_3\}$ и времени t :

$$\phi \frac{\partial C^{(k)}}{\partial t} + (1-\phi) \frac{\partial C^{(\mu)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\phi D_{ij}^{(k)} \frac{\partial C^{(k)}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((1-\phi) D_{ij}^{(s)} \frac{\partial C^{(\mu)}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\phi v_i C^{(k)}) \quad (1)$$

$$C^{(\mu)} = \kappa C^{(k)}, \quad \kappa - const \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} \text{grad } p \quad (3)$$

$$p = C^k RT \quad (4)$$

В уравнении баланса масс (1) величины $C^{(k)}$, $C^{(\mu)}$ обозначают концентрации свободного и адсорбированного газа, измеряемые соответственно в количестве молей, отнесённых к поровому объёму и количеству молей, приходящихся на объём твёрдой фазы. Тензоры $\mathbf{D}^{(k)}$ и $\mathbf{D}^{(s)}$ характеризуют диффузионный молекулярный транспорт свободного и адсорбированного газа соответственно. Безразмерной величиной ϕ обозначена пористость керогена.

В качестве уравнения адсорбции для простоты изложения был выбран закон Генри (2). Для описания вязкого течения вещества с вязкостью μ в нанопорах с тензором проницаемости $\mathbf{k}$ предполагалась справедливость закона Дарси (3), связывающего скорость течения свободного газа $\mathbf{v}$ с градиентом давления. Давление p связывается с концентрацией свободного газа при помощи уравнения состояния (4), где T – температура, а R – универсальная газовая постоянная.

При решении задачи использовался метод асимптотического усреднения, возможность применения которого обеспечивается выполнением условия пространственного разделения масштабов $\varepsilon \sim l/L \ll 1$, где l – характерный размер нанопор, а L – характерный глобальный размер.

В результате было получено нелинейное усреднённое (макроскопическое) уравнение, позволяющее определять распределение концентрации, а значит и давления и скорости газовой фазы. Коэффициенты усреднённого уравнения (эффективные характеристики) определяются из задачи на ячейке с последующим усреднением соответствующих величин по объёму ячейки периодичности.

ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛИИМИДОВ

Семенов Н.А., Сидорова Г.Я., Юмашев О.Б., Гусева М.А., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Электрореологические суспензии (ЭРС) относятся к числу, так называемых, «умных материалов», реологические и механические свойства которых (вязкость, предел текучести, модуль сдвига, и др.) могут резко изменяться под воздействием прикладываемого внешнего электрического поля [1]. ЭР суспензии могут использоваться в качестве рабочих тел в электрически управляемых механических передаточных устройствах – демпферы с электрическим контролем, электромагнитные муфты, различные устройства виброзащиты и др. Они широко востребованы в космической технике, биомеханике, биомедицине и т.д. Практический интерес к ЭР суспензиям определил и появление ряда и экспериментальных исследований.

Изменение реологических свойств ЭР суспензий зависит от состава суспензии. Подобные объекты могут представлять собой коллоидные системы и дисперсии, состоящие из неполярной или слабо полярной дисперсионной среды с низкой диэлектрической проницаемостью и твердой дисперсной фазой с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Дисперсионными средами могут служить слабо полярные органические жидкости. В качестве дисперсной фазы на практике широко применяются, в первую очередь, различные модификации кремнезема – силикагель, аэросил, а также оксиды: титана, бария, стронция, крахмал, целлюлоза, алюмосиликаты и др. Однако ЭР суспензии на основе вышеперечисленных традиционных твердых фаз имеют ряд недостатков. Это, прежде всего, сравнительно низкая агрегативная стабильность, из-за значительной разницы в плотности наполнителя и дисперсионной среды, и потеря ими поляризационных свойств, а также невысокий электроструктурный отклик на электрическое воздействие, характеризуемый небольшим приростом эффективной вязкости среды в электрическом поле.

Разработка принципов и методологии получения нового поколения электроуправляемых реологических материалов и суспензий с наноразмерной дисперсной фазой на их основе, исследование их электрофизических, физико-химических и реологических свойств, а также моделирование их поведения в условиях близких к практическим задачам является важной и актуальной научной задачей [2].

Впервые получены и охарактеризованы электрореологические свойства нового поколения ЭР суспензий с дисперсной фазой на основе наноразмерных частиц полиимида. Установлено, что ЭРС, полученные на основе наноразмерных частиц полиимидов, обладают мощным электрореологическим откликом в десятки раз превышающим электрореологический эффект ЭРС на основе микроразмерных частиц дисперсной фазы – например, оксида титана и крахмала.

На основе температурных испытаний установлено влияние температуры на изменение реологических и электрореологических свойств ЭР суспензий на основе наноразмерного полиимида в постоянных электрических полях. Отмечена слабая зависимость от температуры, что указывает на низкие диссипативные потери при деформировании.

Литература:

1. Hao T. Electrorheological fluids // Adv. Mater. – 2001. – Vol.13. – P.1847-1852.
2. Yanovsky Yu.G., Nikitina E.A., Karnet Yu.N., Nikitin S.M. Smart materials with electrically controlled properties. Electrorheological suspensions with a nanosized

polymeric disperse phase. Part 1. Quantum mechanical modeling of the electrorheological effect // Nanomechanical Science and Technology: An International Journal. – 2011. – Vol.2. – Iss.2. – P.145-166.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ИХ КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Шалашилин А.Д., Семенов Н.А., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Магнитные жидкости и суспензии представляют собой коллоидные дисперсии магнитных материалов (ферромагнетиков магнетита, ферритов) с частицами размером от 5 нанометров до 10 микрометров, стабилизированные в полярных (вода, спирты) или неполярных (углеводороды, силиконы) средах с помощью поверхностно-активных веществ или полимеров. При таких условиях, магнитные жидкости сохраняют устойчивость в течение длительного времени, и обладают хорошей текучестью в сочетании с магнитными свойствами. Если поместить раствор в магнитное поле, то частицы ферромагнетиков будут выстраиваться вдоль силовых линий магнитного поля, образуя цепи. В этом случае, жидкая среда приобретает свойства вязкоупругого твердого тела.

В работе исследовали магнитореологический эффект в статическом и динамическом режимах при температуре 298 К. Реологические испытания проводили на реоспектрометре RS-150 (НААКЕ, Германия) с магнитореологическим узлом, позволяющим создавать магнитные поля различной интенсивности до 0,5 Т. Образцы измеряли в рабочей области (зазоре) типа «плоскость-плоскость», зазор которой составлял 1 мм.

Исследовали образцы суспензий на основе магнетита (синтезированного в ИПРИМ РАН) в различных дисперсных средах, а также коммерческие магнитные жидкости.

Динамические испытания проводили при постоянной скорости сдвига и длительности деформирования в течение 300 с, а также с переменной амплитудой при постоянной частоте и наоборот. Получены усредненные значения напряжений сдвига для различных значений магнитного поля, а также параметры комплексного динамического модуля. Реологические зависимости статических режимов строили в условиях циклического изменения скорости сдвига от 0 до 300 с⁻¹ в различных магнитных полях интенсивностью до 0,5 мТ.

При определенных значениях интенсивности магнитного поля и концентрации дисперсной фазы наблюдался эффект структурирования: существенное повышение вязкости среды и напряжений сдвига по сравнению со средой в отсутствии магнитного поля.

Для описания поведения в нестационарной циклической нагрузки предложена кинематическая модели текучести, которая представляет собой феноменологическое уравнения и путем дифференциального уравнения второго порядка, определяются коэффициенты экспериментальными данными для предельного цикла. Модель позволяет строить много линейные аппроксимации реологических параметров. Результаты показали хорошее сходство с экспериментальными данными.

Секция 3

Проблемы горения и детонации сложных сред

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК БЕСКОМПРЕССОРНЫХ ВРД РАКЕТНЫХ ЛА

Большаинов И.П.¹, Захаров Н.Н.¹, Садовин М.А.¹, Прудников А.Г.², Прядко Е.С.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва*

Даётся анализ возможности аэродинамических труб (АДТ) с длительностью работы от 0.1 до 3-х секунд для определения характеристик внешнего и внутреннего открытого и газогенераторного (ГГ) горения. Приводятся результаты измерений скорости горения, полноты сгорания, температуры и времени воспламенения в зависимости от давления и начальной температуры. По результатам проведённых экспериментов даётся сравнительный анализ измерений газодинамических и аэродинамических параметров, полученных тремя независимыми методами: на баллистическом маятнике, центрифуге и тензометрических весах. Получены скорости нормального и аномального горения пастообразных газогенерирующих составов (ПГСС).

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ГИПЕРЗВУКОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТРУБЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАДАЧ ВНЕШНЕЙ И ВНУТРЕННЕЙ АЭРОГАЗОДИНАМИКИ

Большаинов И.П., Садовин М.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Для проведения измерений и обработки экспериментальных данных, получаемых при испытании моделей в гиперзвуковой импульсной трубе и на других установках, разработана программа с рабочим названием Hypersonic Facility. Для её создания использовался язык G, среда программирования – Labview 2011. В программу заложены широкие возможности по проведению измерений с помощью различных АЦП от National Instruments. Кроме того, расчет параметров течения вынесен в отдельный файл, что позволит легко его дополнить необходимыми расчетами.

Созданная программа опробована при определении характеристик модели «конуса + цилиндр» и других аэродинамических тел, а также при определении характеристик горения твёрдого и пастообразного топлива. С её помощью проведено более 40 экспериментов. Полученное высокое быстродействие программы и удобство её использования, позволяет резко снизить время обработки каждого эксперимента, а также получать результаты в реальном времени, что чрезвычайно важно для достижения достоверных данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ, МНОГОФАЗНЫХ И ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ С ЦЕЛЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ

Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н.

ОИВТ РАН, Москва

Целью работы являлось нахождение условий генерации и возможностей управления свободными тепловыми вихрями - однофазными, многофазными и огненными. Основу работы составляли экспериментальные исследования нестационарных концентрированных вихрей с использованием самых современных методов диагностики (прежде всего, PIV-метода, а также «многоточечной» видеосъемки с применением нескольких камер).

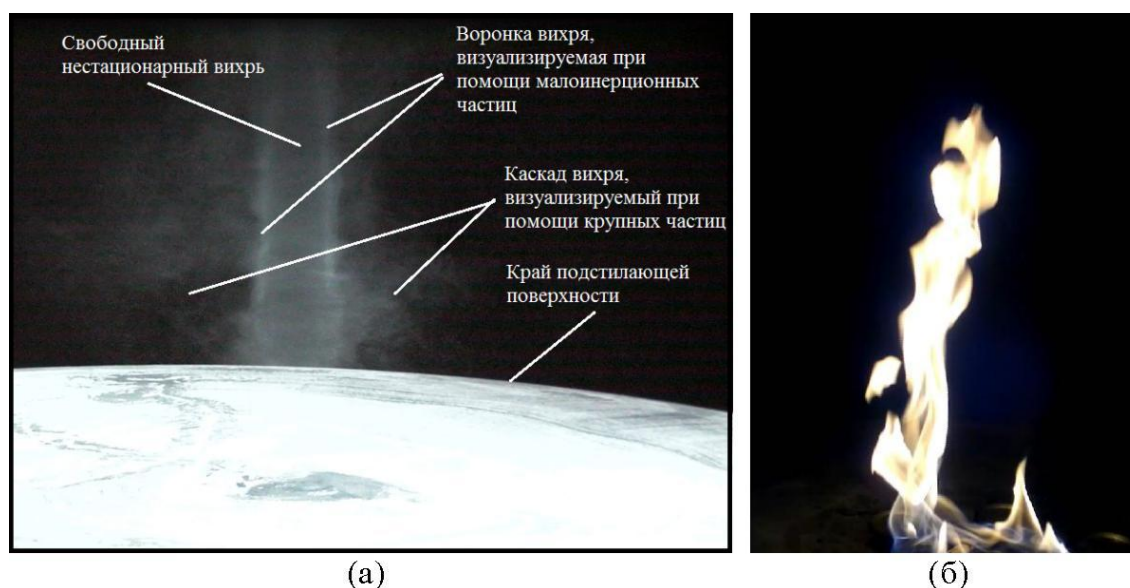


Рис.1. Типичные кадры видеосъемки с зарегистрированными нестационарными вихревыми структурами: (а) – свободный многофазный вихрь; (б) – свободный огненный вихрь.

Впервые осуществлена стабильная генерация свободных нестационарных огненных вихрей различной интенсивности без использования механических закручивающих устройств. В качестве горючего использовались таблетки «сухого спирта», размещаемые в центральной области подстилающей поверхности (металлический лист). В процессе горения таблеток наблюдалась генерация огненных вихрей, высота которых многократно превосходила высоту фронта пламени над областью расположения горючего.

Новые оригинальные результаты фундаментальных исследований генерации и устойчивости свободных концентрированных огненных вихрей, полученные в ходе выполнения работы, станут фундаментом для выработки методов стабилизации и увеличения полноты сгорания углеводородных топлив.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Горение и взрыв».

ПРОЦЕССЫ ПОДЖИГА И ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ С ПРИСАДКАМИ НАНОЧАСТИЦ

Великодный В.Ю.¹, Дыренков А.В.¹, Попов В.В.², Яновский Ю.Г.²

¹Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

В рамках концепции «активированного» пористого топлива [1,2] проводились теоретические и экспериментальные исследования процессов распыления, «активации», поджига и собственно горения жидких топлив на основе керосина.

Был реализован высокочастотный разряд, позволяющий производить наработку радикалов в больших объемах. Это дало возможность реализовать надежный поджиг при сверхзвуковых скоростях (см. рис.1). Сделан вывод о том, что плазма в районе факела находится в сильно неравновесном состоянии, что способствует наработке радикалов в большом объеме.

Исследования горения керосина при добавлении присадок наночастиц (нанотрубок, графена), воды, эмульсий воды и топлива показали, что роль наночастиц состоит в захвате электронов вследствие их большей подвижности. Была предложена и математически реализована «модель горячих очагов». Эксперименты по сжиганию эмульсий мазута с водой могут иметь непосредственный выход в практику эксплуатации отопительных систем. Также результаты данных исследований могут быть использованы в авиационном двигателестроении, в энергетике, на транспорте с целью снижения расхода углеводородных топлив.

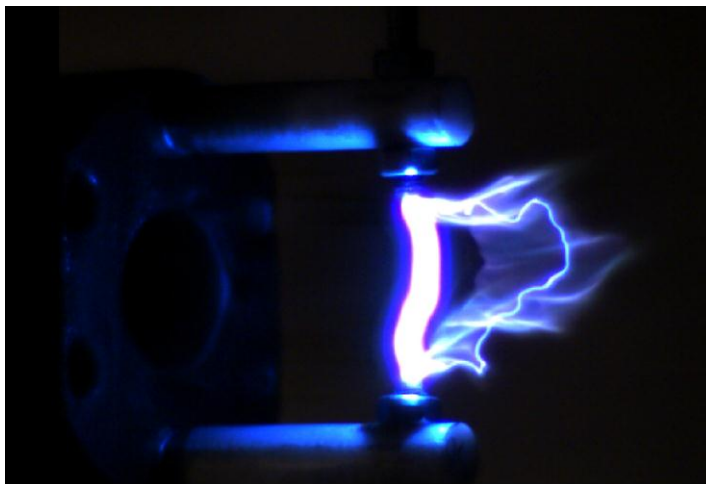


Рис.1. Визуализация работы системы поджига (высокоскоростная цифровая регистрация быстропротекающих процессов камерой FASTCAM SA4 производитель: Photron, made in Japan, model: 500K-C2).

Литература:

1. Бушманов Е.А., Великодный В.Ю., Тимофеев И.Б., Яновский Ю.Г., Van Wie О возможности улучшения характеристик активированного пористого топлива при использовании процессов ионизации в диэлектрическом кавитаторе // Прикладная физика. – 2003. – №5. – С.49-54.
2. Великодный В.Ю., Дыренков А.В., Попов В.В., Яновский Ю.Г. Патент на полезную модель «Система смешения и поджига композитного топлива». – 2013. – №2013136887 /(055524) от 07.08.2013 г.

КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Воротилин В.П., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Без привлечения эмпирических корреляций и подгоночных констант получена замкнутая система уравнений, объединившая в единой картине рассмотренные ранее различные эффекты движения и горения турбулентных струй [1]. Основная цель исследования выяснение и описание механизма воздействия турбулентности на процесс диффузионного горения турбулентных струй во внешней среде окислителя (воздуха). Побудительным мотивом для разработки предлагаемой теории явилось отсутствие в существующих полуэмпирических, расчетных моделях движения и горения турбулентных струй понятия реально существующей и четко различимой границы раздела между турбулентной струей горючего газа и внешним ламинарным течением воздушной среды. Именно с учетом факта существования указанной границы раздела дан вывод обобщенного уравнения захвата внешней среды, замкнувшего систему гидродинамических уравнений движения турбулентных струй. Основой для расчета эффективных скоростей реакций явились представления о турбулентной среде как совокупности независимых турбулентных частиц - вихрей, при случайных контактах которых происходит смешение и горение реагирующих газов. Рассмотрен предел мгновенных реакций, соответствующий режиму диффузионного горения. Особенностью предлагаемой теории явилась необходимость ввести понятие эффективной скорости реакции не только для молекул реагирующих веществ, но также и для занимаемых ими объемов. Было получено уравнение баланса реагирующих объемов, замкнувшее систему интегральных уравнений баланса, описывающих все необходимые свойства быстрых химических реакций в условиях турбулентного смешения реагирующих веществ. Рассмотрены различные сопутствующие эффекты движения и горения, в частности, эффекты излучения, спутного течения внешней среды, турбулентности внешней среды, различия плотностей горючего струи и внешнего течения. Получено качественное согласие теоретических расчетов длины факела горения с имеющимися экспериментальными данными.

Литература:

1. Воротилин В.П., Яновский Ю.Г. О механизме турбулентности в задачах движения и горения турбулентных струй / XVIII-я международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013). Материалы. - М., 2013. - С.525-527.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ГОРЮЧИХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ НА СТРУКТУРУ ФРОНТА ПЛАМЕНИ И ЕГО УСКОРЕНИЕ

Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Яковенко И.С.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

В работе представлены результаты численного моделирования задач о распространении волн горения и детонации в каналах и о взаимодействии дисперсной среды с преградой при истечении продуктов детонации из канала. Рассматривались газообразные дисперсные смеси, состоящие из горючей газовой компоненты (водородно-кислородная или водородно-воздушная смесь) с взвешенными в ней твердыми частицами. Моделирование влияния концентрации нейтральной компоненты горючих газовзвесей на структуру фронта пламени и его ускорение при распространении горения в каналах проводилось с использованием разработанного авторами программного комплекса для двух- и трёхмерных расчетов динамики двухфазных сред (газовая компонента и твёрдые частицы), как для химически нейтральных компонент, так и для ситуации, когда газовая фаза является горючей компонентой. Динамика гетерогенной смеси описывается двухскоростной двухтемпературной континуальной моделью сплошной среды. В принятом приближении поток частиц так же описывается в континуальном приближении. Кроме того в ряде задач газовая компонента рассматривалась как сплошная среда, а поток твердых частиц моделировался по законам стоковской динамики.

Задача о взаимодействии дисперсной среды с преградой решалась в следующей постановке. В начальный момент времени полуоткрытый канал заполнялся стехиометрической водородно-воздушной смесью; на выходе из канала помещался слой микрочастиц заданной толщины; на расстоянии 1-2 калибров от среза канала помещалась твердотельная преграда. Частицы вовлекались в течение продуктов взрыва за прошедшей ударной волной и частично оседали на подложке. Целью исследования являлся выбор оптимальных характеристик дисперсной смеси, обеспечивающих максимально равномерное оседание частиц на подложке. Были исследованы смеси, содержащие различную концентрацию частиц разных размеров (100нм-100мкм). Результаты серии расчетов показали, что в случае ускорения микрочастиц ударно-волновым методом эффективность равномерного напыления возрастает с ростом размеров микрочастиц вплоть до 100мкм. Эффективность напыления так же может быть повышена при специальном подборе пространственной геометрии подложки.

Анализ влияния нейтральной мелкодисперсной примеси на развитие горения водород-кислородной смеси и переход горения в детонацию в каналах показал, что передача части энергии и импульса газовой среды частицам приводит к существенной перестройке течений и деформации фронта пламени, что определяет смену режима ускорения пламени, существенно замедляя процесс перехода к детонации.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №26 «Горение и взрыв».

УСТОЙЧИВОСТЬ ДОЗВУКОВЫХ МИКРО – СТРУЙ И ИХ ГОРЕНИЕ

Козлов В.В.^{1,2}, Грек Г.Р.¹, Катасонов М.М.¹, Коробейничев О.П.³, Литвиненко Ю.А.¹,
Шмаков А.Г.³

¹ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Новосибирск

²Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск

³Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

В работе представлены результаты экспериментальных исследований горения пропана в круглой и плоской микро–струе при малых числах Рейнольдса, находящихся под воздействием поперечного акустического поля. Выявлены особенности эволюции пламени в настоящих условиях. На основе полученной информации обнаружен ряд новых явлений в процессе развития пламени при горении топлива в круглой и плоской микро–струе (см., например, рис.1 и рис.2). Эти явления описаны и объяснены.

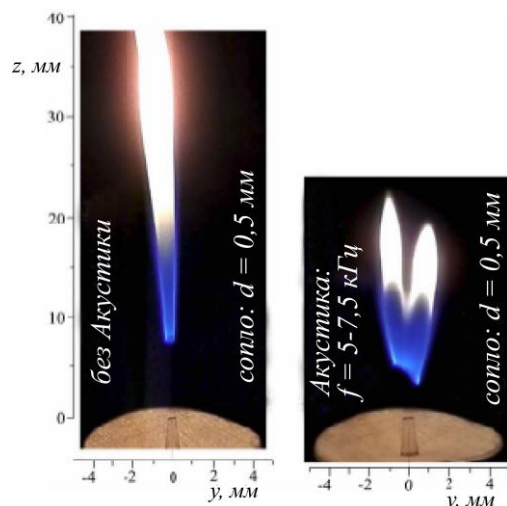


Рис.1. Раздвоение пламени круглой микро – струи (диаметр сопла $d = 0.5 \text{ mm}$) в поперечном акустическом поле.

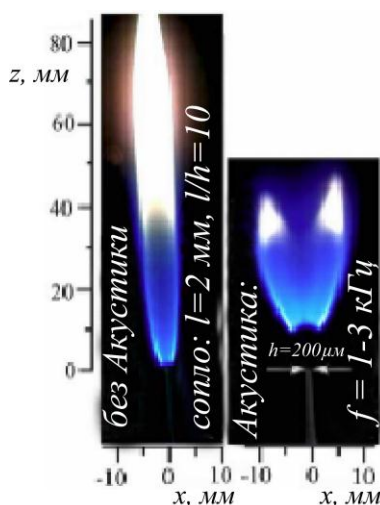


Рис.2. Раздвоение пламени плоской микро – струи в поперечном акустическом поле (сопло: $l = 2 \text{ mm}$, $h = 200 \text{ μm}$, $l/h = 10$).

Литература:

1. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений. – Новосибирск, 2012. – 208 с.
2. Kozlov V.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Litvinenko Y.A. Stability of subsonic jet flows // J. of Flow Control, Measurement & Visualization. – 2013. – Vol.1. – P.94-101.
3. Kozlov V.V., Grek G.R., Katasonov M.M., Korobeinichev O.P., Litvinenko Y.A., Shmakov A.G. // J. of Flow Control, Measurement & Visualization. – 2013. – Vol.1. – P.108-111.
4. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В., Коробенечев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Особенности горения пропана в круглой и плоской макро -и микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Вестник НГУ «Физика». – 2013. – Т.8. – Вып.3. – С.98-119.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ГАЗОВОЙ СТРУЕ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Кривокорытов М.С.^{1,2}, Голуб В.В.¹, Моралев И.А.¹

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

В работе [1] авторами был обнаружен эффект бифуркации диффузионного факела, при этом наблюдалось резонансное снижение концентрации оксидов азота в продуктах горения. Бифуркация факела обусловлена делением струи еще не прореагировавшего газа. В [2] показано, что при внешнем акустическом воздействии в струе развивается асимметричная мода неустойчивости, нарастание которой вниз по потоку приводит к дроблению струи на чередующиеся области, расходящиеся под определенным углом.

Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена экспериментальному исследованию газовых микроструй при акустическом воздействии при помощи современных средств диагностики потока (ParticleImageVelocimetry).

Показано, что под воздействием акустических колебаний на участке струи, примыкающем к открытому концу трубки, внутри струи возникают вихревые структуры. При этом струя совершает колебания как целое. По мере удаления вниз по течению эти колебания нарастают и приводят к дроблению струи на чередующиеся области, расходящиеся под определенным углом. Это приводит к интенсификации смешения газа струи с окружающим воздухом.

*Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований
Президиума РАН «Горение и взрыв»*

Литература:

1. Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Володин В.В. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т.38. – Вып.10. – С.57-63.
2. Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Моралев И.А. Развитие неустойчивостей в газовых микроструях при акустическом воздействии. // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т.39. – Вып.18. – С.38-44.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ НА КОНВЕКТИВНЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ НАГРЕВ МАРСИАНСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Левин В.А., Афолина Н.Е., Громов В.Г.

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

Разработка проектов экспедиции на Марс с возвращением образцов грунта и последующей пилотируемой экспедиции является в настоящее время одним из приоритетных направлений развития современной космонавтики. Успешная реализация этих проектов требует проведения дополнительных исследований по аэродинамике и теплообмену входа в атмосферу Марса, учитывающих специфику траектории полета и конфигурации аппаратов этих экспедиций. В силу значительной разреженности атмосферы Марса при проведении этих исследований важное место занимает разработка термохимической модели газовой среды за ударной волной, учитывающей неравновесный характер протекания физико-химических процессов в ударном слое и на поверхности аппарата. Для упрощения процедуры построения оптимальной модели газовой среды, адекватной рассматриваемым условиям, авторами разработан вычислительный комплекс HIGHTEMP, основанный на пакете программ численного решения уравнений Навье-Стокса для различных моделей газовой среды, интегрированном с соответствующими базами термохимических данных. Реализовано несколько уровней газофазных моделей: от совершенного газа до многотемпературной, многокомпонентной ионизированной газовой среды. В кинетическую модель включены неравновесные химические реакции, процессы ионизация и релаксации внутренних энергетических мод с учетом их взаимодействия. В граничных условиях на поверхности обтекаемых тел могут учитываться эффекты скольжения, конечная скорость энергетических обменов, поверхностный катализ и абляция. Уравнения Навье-Стокса решаются на многоблочной структурированной сетке методом конечного объема. Вычислительный комплекс включает также программы расчета переноса селективного излучения. В настоящем исследовании разработанная технология использована для изучения входа в атмосферу Марса космического аппарата «экспедиции возвращения» на примере тестовой модели аппарата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-01-00068), Федерального агентства по науке и инновациям (НИИ 5911.2012.1) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 25.

УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ

Левин В.А.^{1,2}, Журавская Т.А.¹

¹НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²ФГБУН Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

В рамках детальной кинетики химического взаимодействия численно исследована возможность стабилизации детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в плоские каналы различной формы. Предполагалось, что скорость потока газовой смеси существенно превосходит скорость распространения самоподдерживающейся волны детонации в покоящейся смеси с параметрами входящего потока.

Изучена стабилизация ячеистой детонационной волны в сверхзвуковом потоке в плоском канале с параллельными стенками с помощью слабых дополнительных разрядов. Установлено, что дополнительный энергоподвод стабилизирует детонационное горение в потоке, если энергия дополнительных разрядов больше некоторой критической энергии (зависящей, главным образом, от числа Маха набегающего потока). В случае стабилизации волна детонации выходит на стационарный пульсирующий режим. Детально рассмотрено влияние числа Маха потока, энергии дополнительных разрядов и их локализации на процесс стабилизации детонационного горения.

Исследована возможность стабилизации детонационной волны в горючей смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в плоские каналы различной формы, без дополнительного энергоподвода. Так, подробно исследовано распространение сформированной волны детонации в каналах с гладко меняющейся площадью поперечного сечения. Для различных чисел Маха входящего потока определены геометрические характеристики канала, обеспечивающие стабилизацию в нем детонационного горения. Для некоторых значений числа Маха входящего потока предложен способ определения формы канала, в котором без энергоподвода формируется стационарная детонационная волна (рис.1).

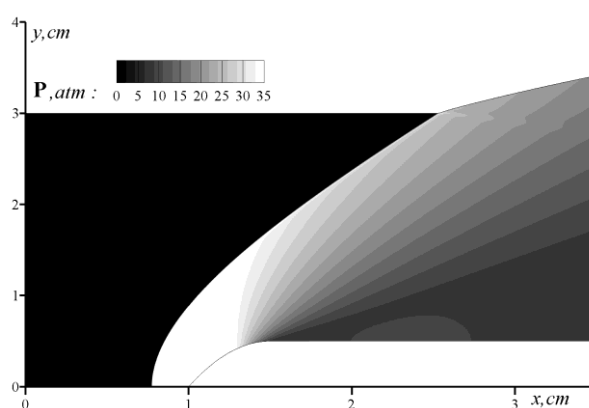


Рис.1. Формирование стационарного детонационного горения в плоском канале сложной формы при числе Маха входящего потока $M=7$.

Работа поддержана РФФИ (грант № 11-01-00068а), Министерством образования и науки РФ (НШ – 5911.2012.1), программой Президиума РАН. При проведении исследований был использован суперкомпьютер «Ломоносов» МГУ имени М.В. Ломоносова.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР ДЕТОНАЦИИ

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

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

В рамках Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Горение и взрыв» проведено численное моделирование газовой детонации в каналах различного поперечного сечения. Изучена трехмерная ячеистая структура детонации, которая развивается спонтанно из плоской одномерной детонационной волны в силу ее неустойчивости. Для каналов с прямоугольным сечением показано, что при уменьшении длины одной стороны сечения реализуется переход к двумерной ячеистой детонации. Определено критическое значение длины этой стороны, разделяющее режимы детонации с двумерной и с трехмерной ячеистой структурой, для которой характерно распространение поперечных волн в любом направлении, перпендикулярном направлению распространения головного фронта детонации. Для каналов с минимальной шириной поперечного сечения, близкой к критической, на боковых поверхностях канала наблюдались размытые двумерные ячеистые шлирен-диаграммы. Для всех каналов разной формы со сравнимыми, достаточно большими размерами поперечного сечения получена нерегулярная и в некоторых случаях хаотичная трехмерная ячеистая структура детонации. Моделирование проведено в каналах большой длины (до 1 метра), что позволило изучить особенности трансформации ячеистой структуры детонации в процессе ее распространения. Проведено моделирование детонации в трехмерном канале круглого сечения достаточно малого диаметра и установлено, что изначально плоская волна детонации спонтанно трансформируется в волну спиновой детонации. При этом наблюдались четыре фазы течения: 1) распространение одномерной детонационной волны с возрастанием возмущений, вносимых из-за ограниченной точности арифметических операций; 2) переходная фаза детонации, подобная трехмерной ячеистой детонации, с интенсивными поперечными волнами; 3) переходная фаза постепенной трансформации поперечных волн в одну вращающуюся поперечную детонационную волну; 4) спиновая детонация, при которой ее фронт равномерно вращается вокруг оси симметрии, двигаясь вдоль нее. Найдено критическое значение диаметра канала, разделяющее режимы с трехмерной ячеистой детонацией и режимы со спиновой детонацией. Получена спиновая детонация в канале эллиптического сечения, при которой интенсивность вращающейся детонационной волны периодически изменяется из-за различной кривизны эллипса в различных точках его границы. Расчеты проведены на суперкомпьютере «Ломоносов» с числом расчетных ячеек от 0,1 до 10 миллиардов. Все расчеты ячеистой и спиновой детонации проводились во всем трехмерном канале, а не только в его части, содержащей детонационную волну.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 11-01-12043-офи_м, 12-01-90416-Укр_а, 12-01-31118-мол_а), Совета по грантам Президента РФ (НШ-5911.2012.1, МК-3355.2012.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ НИИ МЕХАНИКИ МГУ

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В., Хмелевский А.Н.

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

В современных реактивных двигателях используются разнообразные сопловые устройства и их комбинации для оптимизации габаритно-массовых и тяговых характеристик летательных аппаратов. Применение компактных кольцевых и линейных двухщелевых сопел может оказаться более предпочтительным по сравнению с традиционными соплами Лаваля. В настоящей работе в рамках Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Горение и взрыв» проводились экспериментальные исследования на установке НИИ механики МГУ для определения влияния состава, параметров торможения рабочего газа и размеров соплового устройства на характер течения и силовые характеристики модели тягового модуля на базе компактных кольцевых сопел с внутренней полостью. В каждом опыте контролировались сигналы с пьезоэлектрических и тензометрических датчиков давления, а реактивное усилие на тяговую стенку модели измерялось тензометрическим датчиком силы. Полученные экспериментальные значения давления, силы тяги, времен запуска соплового устройства и времен квазистационарного истечения газа являются важными параметрами для тестирования и верификации математических моделей расчета течений в устройствах со сложной геометрией проточных каналов. В процессе выполнения проекта были проведены продувки воздухом модели тягового модуля с критическим сечением кольцевого сопла $h_* = 2.01$ мм. Получены новые экспериментальные данные для тестирования и верификации нестационарных моделей расчета течений в подобных устройствах. Подтверждена корректность оригинальной методики измерений тяги кольцевого сопла с внутренней полостью в импульсной аэродинамической установке за времена порядка 10 мс и установлена верхняя частотная граница на скорость изменения давления торможения – $F_h \approx 0,14\text{--}0,19$ Кгц до которой используемая методика измерений тяги дает достоверные результаты.

В теоретической части исследования проведено численное моделирование продувок тягового модуля воздухом и высокотемпературными продуктами сгорания ацетиленовоздушной смеси при нескольких значениях давления в реакторе и ширины кольцевого сопла. Получены нестационарные поля параметров потока и зависимости от времени интегральных характеристик тягового модуля. Проведен анализ динамики процесса и выявлены неизвестные ранее закономерности, среди которых сложная вихревая структура течения, вызванная уступом. Выполнены расчеты течения при меньшем диаметре реактора и проведено сравнение с результатами для стандартного реактора. Сравнение данных экспериментов и расчетов показывает хорошее соответствие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 11-01-12043-офи_м, 12-01-90416-Укр_а, 12-01-31118-мол_а), Совета по грантам Президента РФ (НШ-5911.2012.1, МК-3355.2012.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ И ПРИМ РАИ В НАТУРНОМ И ВИРТУАЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Левин В.А.¹, Яновский Ю.Г.², Марков В.В.¹, Большаков И.П.², Захаров Н.Н.²,
Мануйлович И.С.¹, Прудников А.Г.³

¹НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

³ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва

В рамках Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Горение и взрыв» в 2012 году начато, а в 2013 году продолжено совместное комплексное экспериментально-теоретическое исследование ИПРИМ РАН и НИИ механики МГУ газодинамических процессов в импульсной гиперзвуковой аэродинамической установке.

Одним из результатов кооперации институтов РАН и МГУ стало создание и апробирование виртуальной модели реальной экспериментальной установки, реализованной в оригинальной программе для персонального компьютера с удобным интерфейсом, позволяющим в интерактивном режиме благодаря встроенной визуализации наблюдать во время расчета в динамике поля параметров потока и их изменения со временем в определенных точках, соответствующих датчикам на установке. Тем самым открыто новое направление – создание специализированных вычислительных программ – виртуальных установок, аналогов реальных экспериментальных устройств, – которые могут быть использованы исследователями без специальной подготовки. Такие виртуальные установки позволяют практически даром, без затрат на изготовление дорогостоящего оборудования и расходные материалы, проводить априорные исследования, а также корректировать параметры устройств и стратегию реального эксперимента. Учитывая опыт проведенных исследований, можно констатировать, что в малом масштабе реализована идея академика О.М. Белоцерковского о создании отечественных вычислительных комплексов на современной вычислительной базе, доступных для контроля, с предсказуемыми свойствами, надежных и простых в эксплуатации.

В докладе представлена компьютерная программа – виртуальная аэродинамическая труба, приведены результаты моделирования ряда реальных процессов в сравнении с данными экспериментов: течение в пустой аэродинамической трубе; обтекание тела сложной формы, цилиндра и цилиндра с иглой, а также горение твердотопливной шашки в покоящемся воздухе и в сверхзвуковом потоке. Сравнение результатов натурных и виртуальных экспериментов показывает их хорошее соответствие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 11-01-12043-офи_м, 12-01-90416-Укр_а, 12-01-31118-мол_а), Совета по грантам Президента РФ (НШ-5911.2012.1, МК-3355.2012.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕЙ ВОДОРОДА И УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОЗДУХОМ

Набоко И.М.¹, Рубцов Н.М.², Сеплярский Б.С.², Черныш В.И.², Цветков Г.И.²

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

²ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
г. Черноголовка

Проявления неустойчивостей процессов горения реакционно-способных смесей многообразны, исследуются давно, но остаются слабо изученными, хотя прогресс в создании энергопроизводящих и энергообменных устройств невозможен без уменьшения влияния неустойчивости. В соответствии с целью и задачами проекта были проведены экспериментальные исследования развития термодиффузионных, гидродинамических и акустических неустойчивостей при воспламенении и горении смесей водород – и углеводород-воздух, были выявлены их закономерности и рассмотрены возможности управления процессами горения в цилиндрических реакторах на стадии перехода от сферического пламени к плоскому а также при выходе фронта горения из сферических объемов, ограниченных металлической сеткой.

В стальном и кварцевом цилиндрических реакторах проведены исследования развития горения и переходных процессов при изменении граничных условий движения фронта горения. В экспериментах осуществлена цветная скоростная киносъемка горения с торца и через боковую поверхность реакторов с одновременной регистрацией давления в реакторе и акустических колебаний догорающего газа. Отметим, что малые лабораторные установки, подобные использованным в данной работе, дают возможность не только получать новые знания, но и проводить фундаментальные исследования с минимальными затратами, существенно повышая эффективность работы на больших стендах ОИВТ РАН, моделирующих натурные условия.

На примере горения смесей н-пентана, разбавленных CO_2 и Ar , при 1 атм показано, что при торможении фронта пламени вблизи торца реактора горение проявляется в виде горячих точек, при разбавлении пламя приобретает ячеистую структуру; особенности распространения пламени в смеси $2\text{H}_2\text{-O}_2$ при центральном инициировании искрой не зависят от материала внутренней поверхности реактора (нержавеющая сталь, TiO_2 , Ta , Pt) но зависят от степени ее шероховатости. Показано, что инициированные искрой пламена 8%-15% H_2 в воздухе проходят через сеточные сферы с размером ячеек 0.04-0.1 мм², при этом пламя смеси 15% H_2 в воздухе после препятствия ускоряется. В отличие от горения смесей H_2 -воздух для пламен CH_4 с воздухом у внутренней поверхности сетки наблюдается остановка и потухание пламени. Показано, что активные центры горения CH_4 и H_2 , определяющие распространение пламени, имеют разную химическую природу. Причина остановки пламени CH_4 -воздух связана с тем, что атомы H легко проникают через препятствие, а носители цепей процесса горения CH_4 активно гибнут на поверхности сетки. Показано, что пламена CH_4 с кислородом, инициированные искровым разрядом в ячеистых алюминиевых сферических препятствиях с размером ячейки 0.1-0.2 мм² при давлении до 200 Торр не проникают через препятствие.

Литература:

1. Рубцов Н.М., Набоко И.М. Нестационарное горение газов. Актуальные проблемы, 121 с., LAP LAMBERT Academic Publishing, Copyright 2013. Saarbrücken, ISBN: 978-3-659-38720-3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ И ИНГИБИРОВАНИЯ БОЛЬШИХ СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ЗАРЯДОВ

Петухов В.А.¹, Набоко И.М.¹, Азатян В.В.², Гусев П.А.¹, Солнцев О.И.¹, Бублик Н.П.¹, Гуткин Л.Д.

¹*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*

²*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, г. Черноголовка*

Была создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать горение газовых смесей, заключенных в сферическую оболочку объемом до 40 м³. Оболочка была сделана из тонкой резины. При исследовании горения смесей с начальным объемом до 15 м³ использовалась специальная планка, которая представляла собой прямоугольный короб с внешним размером сечения 80х60 мм и длиной 1,5 м. Одна из широких сторон – плоская. На нем были расположены 4 пары датчиков: датчики импульсного давления и ионизационные датчики, фиксирующие давление ударных волн при их перемещении вдоль планки и движение фронта пламени. Это устройство помещалось внутрь взрывной камеры 13ЯЗ диаметром 12 м. Для исследования эволюции сферического пламени в объемах 40 м³ вместо планки была установлена трубка диаметром 11 мм, внутри которой проходил кабель для инициирования процесса. Развитие процесса горения регистрировалось с помощью скоростной видеокамеры.

Подавление горения водородно-воздушных смесей имеет большое значение для безопасности ряда отраслей и, особенно, для атомной энергетики. Одним из самых эффективных способов подавления горения является ингибирование газовых смесей. С точки зрения безопасности промышленных помещений представляют интерес эксперименты, проведенные в больших объемах. До настоящего времени воздействие ингибитора АКАМ на водородно-воздушные смеси изучалось в бомбах объемом десятки литров и на ударных трубах. В данной работе исследования проводились в объемах около 7 м³, что является существенным шагом на пути использования ингибитора АКАМ в производственных целях. В дальнейшем предполагается провести испытание в объемах до 100 м³. В данной работе было исследовано действие ингибитора АКАМ на водородно-воздушные смеси, близкие по составу к стехиометрическим. Ингибитор АКАМ, разработанный в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, представлял собой смесь пропана, пропилена и бутана. Инициирование смеси осуществлялось искрой и электровзрывом проволоочки энергией от 1 до 70 Дж. Добавка ингибитора в водородно-воздушную смесь резко снижала видимую скорость горения и при добавке 6% (об.) ингибитора АКАМ воспламенение смеси прекращалось.

В рамках данной программы начаты работы по исследованию влияния энергии инициирования на турбулизацию, на гидродинамическую устойчивость и скорость движения фронта пламени больших сферических объемах водородно-воздушной смеси. Получены результаты изучения процесса горения стехиометрической водородно-воздушной смеси с начальным объемом 40 м³, иницируемой в центре энергией 1 и 70 Дж.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА

Полежаев Ю.В., Гешеле В.Д., Раскатов И.П., Стоник О.Г.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

1. Проведены экспериментальные исследования вибрационного горения твердого топлива. Получены экспериментальные характеристики автоколебательного процесса вибрационного горения твердого топлива: древесины, древесного угля, сухого спирта, древесных пеллет. В результате анализа полученных диаграмм амплитудных и частотных характеристик вибрационного горения твердого топлива в зависимости от положения зоны горения в трубе Рийке, структуры топлива и способов загрузки сделано следующее предположение. При вибрационном горении твердого топлива сосуществуют два типа процесса. Для основных гармоник колебательного процесса – известный в литературе "энергетический" подход; для гармоник более высокой частоты – вихревой механизм. Разработаны и применены методы экспериментальной верификации этого предположения с помощью "демпфирующей" приставки и "флажков" диффузионного пламени. Результаты опытов подтверждают предложенную физическую модель вибрационного горения твердого топлива.

2. Замерено изменение температуры пламени при возбуждении вибрационного горения. При этом при определенных условиях изменяются параметры пламени: снижается температура, пламя вибрирует и принимает голубой оттенок, укорачивается длина пламени, увеличивается теплоотдача на стенках камеры сгорания. Отмеченные эффекты могут привести к снижению выхода ^{137}Cs в летучей фазе и повышению её концентрации в зольном остатке при сжигании древесины и торфа, загрязненных радионуклидами.

3. Проведено исследование распределения ^{137}Cs в зольных отходах и продуктах сжигания, загрязненных радионуклидами древесного топлива, в зависимости от температуры процесса, содержания кислорода и серы в реагентной смеси.

4. Полученные результаты свидетельствуют о возможности оптимизации параметров топочного режима, в том числе температуры пламени, при которых обеспечивается максимальная степень фиксации радионуклидов в зольных остатках и минимальный их вынос с газовой фазой.

5. На основании анализа экспериментальных результатов работы по измерениям зависимостей температуры пламени и плотности теплового потока на стенке камеры сгорания сделан вывод о том, что при переходе к вибрационному горению температура пламени снижается, а плотность теплового потока на стенке камеры сгорания растет.

6. Полученные результаты позволяют разработать рекомендации по сжиганию твердого биотоплива с улучшенными экологическими характеристиками выбросов и с повышенными показателями теплообменных параметров, что улучшает эффективность работы топочных устройств с твердым биотопливом в генераторах тепла.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, В ЗАДАЧАХ ГОРЕНИЯ

Семянистый А.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Вычислительные модели гидромеханики, основанные на представлении исследуемой среды совокупностью взаимодействующих между собой дискретных частиц, интенсивно развиваются. Бессеточный численный метод гидродинамики сглаженных частиц [1] или SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) разработан для изучения динамики сред с подвижными поверхностями раздела и позволяет рассчитывать области течений с различающимися аэрофизическими свойствами. Процессы горения, взрыва и детонации как раз и составляют круг таких явлений. Для визуализации расчетов удобно использовать открытую программу ParaView [2].

Тем не менее, существует потребность в разработке специализированных программ визуализации расчетов, которые бы позволяли учитывать особенности конкретной реализации метода SPH.

Разработана программа визуализации расчетов, полученных методом сглаженных частиц, на основе многоядерной графической карты типа NVIDIA CUDA GTX-590 и библиотеки OpenGL. Интерфейс программы основан на технологии MFC Visual Studio 2008. Данные расчетов принимаются в формате *.CSV. Визуализация осуществляется в виде цветовой заливки или в градациях серого цвета. Предусмотрены способы визуализации: массива граничных частиц, массива подвижных частиц, скалярных значений на поверхности и в сечениях. Предусмотрен просмотр расчетов по временному шагу и копирование визуализации в буфер Windows. Объем программы на языке C++ составляет более 28 тысяч строк. На рис.1 приведен скриншот разработанной программы при визуализации открытых данных «DamBreak» из проекта dual.sphysics.org [3].

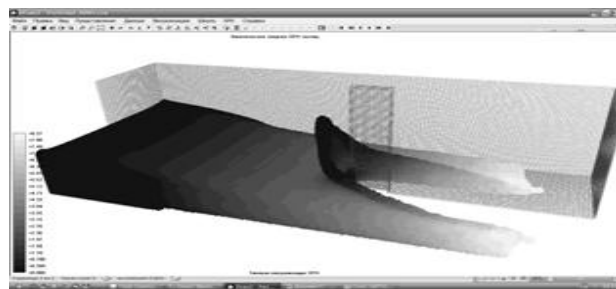


Рис.1. Визуализация опрокидывания дамбы «DamBreak» [3].

Литература:

1. Гидродинамика сглаженных частиц: [Электронный ресурс] //Википедия, 2013. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Гидродинамика_сглаженных_частиц. (05.12.2013).
2. ParaView: [Электронный ресурс] //Википедия, 2013. URL:<http://ru.wikipedia.org/wiki/ParaView>. (Дата обращения: 05.12.2013).
3. DualSPHysics: [Электронный ресурс] // 2013. URL:<http://dual.sphysics.org>. (Дата обращения: 05.12.2013).

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ЯВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЗАДАЧАХ ГОРЕНИЯ

Семянистый А.В., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Многие физические процессы описываются дифференциальными уравнениями. Например, задача химической кинетики в процессах горения или задача о распространении света в усиливающей среде. Интегрирование таких дифференциальных уравнений с применением явных численных схем встречает существенные трудности и может даже привести к изменению на шаге знака заведомо положительного решения [1]. Необходимость применения явных схем решения возникает при построении численных схем решения уравнений в частных производных, например при использовании явного метода гидродинамики сглаженных частиц.

Таким образом, существует задача построения явной разностной схемы, обладающей повышенной точностью, в том числе и в случае произвольного знака диссипативного члена.

Для построения явной разностной схемы используется способ, предложенный в работе [2]. Используя приведенный в [2] программный код аналитических вычислений на языке пакета MAPLE 5 можно показать, что предложенное явное численное решение дифференциального уравнения вида

$$\frac{d}{dx}y(x) = a_0 y(x) + f_0 \quad (1)$$

на интервале $[x_0, x_1]$ шага T , $x_1 = x_0 + T$, с начальным условием $y(x_0) = y_0$ и постоянными a_0 , f_0 имеет вид

$$y(T) = y_0 e^{a_0 T} + \frac{3 f_0 (2 - a_0 T) T}{2(a_0^2 T^2 - 3a_0 T + 3)} \quad (2)$$

Поскольку знаменатель всегда положителен, то при $y_0 \geq 0$ и $f_0 \geq 0$ численное решение (2) на шаге сохраняет знак при $a_0 T \leq 2$. Применение метода наименьших квадратов гарантирует минимальную ошибку аппроксимации невязки уравнения (1) в смысле нормы, приведенной в [2].

Литература:

1. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
2. Семянистый А.В. Способ построения разностных схем повышенной точности для линейного дифференциального уравнения на основе метода наименьших квадратов и пример открытого программного кода / XVIII-я Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС 2013). Материалы. – 22-31 мая 2013г, Алушта – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С.136-138.

УПРАВЛЕНИЕ ГОРЕНИЕМ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ ИЗМЕНЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Третьяков П.К., Тупикин А.В., Козулин В.С., Зудов В.Н., Казазаев А.В.,
Крайнев В.Л.

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

В докладе представлены результаты работы по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН №26 «Горение и взрыв» (проект №9 «Управление горением углеводородных топлив изменением пространственной конфигурации внешнего электрического поля»).

Основная цель работы решение фундаментальной проблемы физико-химической гидродинамики, связанной с изучением механизмов воздействия внешнего электрического поля с непостоянным пространственным распределением напряженности на физико-химические и гидродинамические процессы при сжигании газообразных углеводородных топлив.

Основная задача изучение влияния изменения направления внешнего электрического поля на горение, с целью исследования механизма воздействия на процессы смешения, условия стабилизации и интегральные характеристики.

В работе изучалось влияние изменения во времени конфигурации поля (вращения вектора напряженности поля относительно оси диффузионного факела) на горение пропана. Экспериментальная установка включала в себя горелку диффузионного типа (диаметр 1 мм) с 8 тонкими электродами, расположенными по кругу диаметра 14 мм на расстоянии 10.5 мм от среза горелки. Горелка выступала в роли положительного электрода, либо была непроводящей. Напряжение последовательно подавалось на один либо на противоположащие пары электродов, создавая конфигурацию поля, вращающегося вокруг оси струи. В эксперименте регистрировалась форма пламени на длинах волн промежуточных продуктов реакций (ОН, СН, C₂), параметры поля (частота переключения и напряжение). По снимкам пламени определялась эффективная длина факела и положение максимума интенсивности собственного свечения.

Основные результаты исследования:

1. Вращение поля приводит к улучшению процесса смешения, о чем свидетельствуют:
 - уменьшение эффективной длины факела;
 - смещение максимума интенсивности излучения на длине радикалов СН и C₂.
2. Наблюдается сохранение полного интеграла интенсивности.
3. Подача напряжения на противоположащие электроды, более эффективно, чем в конфигурации горелка + отрицательный электрод.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В СМЕСЯХ МЕТАН/ВОЗДУХ/ЧАСТИЦЫ Fe

Тропин Д.А., Федоров А.В.

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

Вопросы воспламенения метановых смесей в настоящее время являются актуальными, как с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности в угольных шахтах, так и с точки зрения их безопасного использования в различных энергетических системах. И если воспламенение чистой метано-воздушной смеси уже довольно подробно изучалось, то задачи, касающиеся воспламенения данных смесей при добавлении в них реагирующих частиц еще далеки от своего решения. Добавление таких частиц в реагирующую газовую смесь может привести к изменению пределов воспламенения газовой смеси, что может позволить управлять процессами их воспламенения.

В настоящей работе предложена физико-математическая модель воспламенения смесей метан-кислород-азот/аргон в присутствии мелких металлических частиц, учитывающая детальные кинетические механизмы химических превращений реагирующей газовой смеси и приведенные кинетические механизмы окисления металлических частиц. Выявлено влияние давления и температуры на времена задержки воспламенения таких смесей. Показано, что наличие мелких металлических частиц приводит к уменьшению времени задержки воспламенения метановых смесей при малых температурах (менее 1150K) и увеличению при больших температурах (более 1150K). Оказалось, что уменьшение давления смеси приводит к увеличению ширины диапазона температур, в котором частицы ускоряют воспламенение газовой смеси. Сравнение данных по временам задержки воспламенения в смесях метан-воздух-частицы железа, полученных в расчетах и экспериментах в установке быстрого сжатия [1], показало их удовлетворительное соответствие в области изменения температур 900 – 1200 K и давлений 1-1,2 МПа.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки
Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0645, программы фундаментальных
исследований Президиума РАН, интеграционного проекта СО РАН – НАН Белоруссии
2013, РФФИ – 11-08-00144-а.*

Литература:

1. Лещевич В.В., Пенязков О.Г., Шимченко С.Ю. Неоднородное самовоспламенение метано-воздушных смесей в установке быстрого сжатия / Третий Минский международный colloquium по физике ударных волн, горения и детонации (ММК-2013). Сборник трудов. – Минск, Беларусь, 11-14 ноября 2013. – с.1-8.

СТРУКТУРА УДАРНЫХ ВОЛН В ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЕ С ДВУМЯ ДАВЛЕНИЯМИ

Федоров А.В.

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

Проблема физико-математического моделирования распространения волновых процессов в газовых мелкодисперсных средах является актуальной для многих технологических процессов химической, добывающей, аэрокосмической промышленности, где определяющими являются законы механики гетерогенных сред. Например, при пропускании реагентов через взвешенные слои катализаторов, поддерживаемых восходящим потоком газа для определения возможных типов течения необходимо принимать во внимание взаимопроникающее движение фаз и компонентов. Интерес представляет и проблема о поднятии слоя реагирующих частиц (уголь, алюминий, железо и т.д.) насыпной плотности ударной волной с точки зрения создания условий, опасных по воспламенению, горению и возможно детонации частиц. Поэтому создание математических моделей газозвесей с конечной объемной концентрацией частиц, требующих учета межгранулярного, хаотического давления, представляется важной. Ниже мы исследуем, какие виды сильных разрывов существуют в такой дисперсной среде, и при каких условиях они реализуются. В качестве физико-математической модели течения примем модель взаимопроникающего движения двух непрерывных взаимодействующих континуумов, параметры каждого из которых (такие как скорость, плотность, давление) усреднены по объему. Первая среда – газ, вторая – частицы. Движение такой двухфазной среды в изотермическом случае, с учетом давления частиц, описывается уравнениями сохранения массы и импульса, а также уравнениями состояния обеих фаз. Для газа это аналог изотермического уравнения состояния Клайперона – Менделеева, а для частиц различные аппроксимации экспериментальных зависимостей давления частиц от их объемной концентрации. Эту систему уравнений замкнем основным равенством механики гетерогенных сред и законами силового взаимодействия между фазами. Рассмотрим предельный вариант данной системы, когда в уравнении сохранения импульса частиц можно пренебречь членом обусловленным произведением градиента давления газа на объемную концентрацию частиц. В данном случае система уравнений становится системой уравнений гиперболического типа.

На ее основе была решена задача о структуре ударной волны (УВ). Для этого в уравнениях движения был осуществлен переход к системе координат, движущейся с фронтом. Для полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений поставлена краевая задача, решение которой физически интерпретируется как описывающее тонкую структуру сильного разрыва в газозвеси. Аналитически показано, что возможны структуры с ударными волнами однофронтных и двухфронтных конфигураций в виде замороженных и дисперсионных УВ. Проведенные расчеты иллюстрируют высказанные утверждения.

Работа была частично поддержана РФФИ (проект 11-08-00144-а), Министерством образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0645, Программой фундаментальных исследований Президиума РАН.

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Федоров А.В., Фомин П.А., Тропин Д.А.

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

Взрывоопасные смеси, которые образуются в угольных шахтах, это смеси воздуха и природного газа, который состоит в основном из метана с небольшими примесями других углеводородов. Хотя большинство взрывов газа в угольных шахтах порождают волны дефлаграции, наихудший сценарий предполагает зарождение детонационных волн (ДВ), которые чрезвычайно разрушительны, и давление в которых может достигать десятки МПа при отражениях.

В литературе приведено множество детальных кинетических схем для моделирования детонационных режимов сгорания метано – воздушных смесей. В тоже время их широкое применение в практике расчетов детонационных течений сдерживается значительными затратами времени вычислений, обусловленными необходимостью расчета жестких систем уравнений химической кинетики и нелинейных уравнений газовой динамики. Для оценки параметров взрыва реагирующей смеси в тех или иных практических условиях иногда бывает достаточным иметь некоторую приведенную кинетику, которая вполне удовлетворительно описывает интегральные параметры смеси: изменение молярной массы, показателя адиабаты и внутренней энергии среды в зоне основного тепловыделения ДВ в метано-воздушных смесях и термодинамические параметры метано-воздушных смесей в состоянии химического равновесия.

Для этой цели нами была предложена физико-математическая модель детонационного сгорания метана в проходящих ударных волнах, основанная на новой двухстадийной приведенной кинетике воспламенения и горения метана в воздухе и кислороде в рамках подхода Николаева-Фомина-Зака. На ее основе определены структуры детонационной волны в стехиометрической, обедненной и обогащенной окислителем смеси метан-воздух в режиме Чепмена – Жуге и пересжатом. Проведенное сравнение рассчитанных зависимостей скорости детонации от концентрации метана в метан – кислородной смеси с представленными в литературе данными показало их удовлетворительное соответствие.

Исследование выполнено при поддержке: - Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, - Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.V37.21.0645, РФФИ – 11-08-00144-а.

ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА НА УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОМ ЦИКЛОГЕКСАНЕ

Фомин П.А.

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

Рассмотрено взаимодействие волны газовой детонации, распространяющейся сверху вниз, с поверхностью пузырьковой жидкости. Показано, что это является не только причиной генерации в пузырьковой смеси ударной волны и последующего инициирования пузырьков, но и существенно интенсифицирует процесс межфазного тепло- и массообмена на поверхности жидкости посредством механического перемешивания фаз. При определенных условиях это может приводить к новому взрыву (или серии последовательных взрывов) газовой смеси. Сделана оценка массы испаренной жидкости и температуры паров.

Разработана физико-математическая модель ударно-волнового инициирования кислородсодержащих пузырьков, находящихся в жидких углеводородных горючих. Модель использована для расчета взрыва пузырьков, в которых начальная концентрация паров горючего находится вне концентрационных пределов воспламенения.

Показана принципиальная возможность конденсации паров горючего при сжатии переобогащенного горючим пузырька, находящегося в жидком циклогексане при относительно высокой начальной температуре. Конденсация приводит к тому, что концентрация паров горючего уменьшается и становится меньше верхнего концентрационного предела воспламенения. В результате взрыв первоначально негорючего пузырька становится возможным. Сделана оценка скорости конденсации. Она достаточно велика, чтобы существенно изменить химический состав газа за время первой пульсации пузырька.

Сделан расчет области воспламенения пузырька в зависимости от начального давления и температуры. Учет конденсации приводит к расширению области взрывных пределов.

Рассмотрены пузырьковые жидкости (2-этилгексанола и кумола), в которых концентрация паров горючего изначально меньше нижнего концентрационного предела воспламенения. Показано, что испарение жидкости, вызванное механическим перемешиванием фаз, может сдвинуть химический состав газа внутрь области воспламенения, что при соответствующем росте температуры газа приводит к взрыву пузырька. Результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным.

Впервые качественно рассмотрены взрывные процессы в пузырьковых средах, содержащих жидкое монотопливо. Высказаны предположения о возможности многократного взрыва одиночного пузырька при его нагружении серией ударных волн и многократного прохождения детонационной волны по жидкости с распределенными в ней пузырьками (что может быть использовано для генерации серии мощных акустических сигналов в окружающем пространстве, заполненном водой).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0645 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В СИЛАНСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ПУТЕМ ДОБАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ ИНЕРТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

Фомин П.А.¹, Федоров А.В.¹, Дж.-Р. Чен²

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

²National Kaohsiung First University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan

На примере силано-воздушных и силано-кислородных смесей рассмотрен метод [1] ослабления и гашения газовой детонации инъекцией химически инертных микрочастиц (Al_2O_3).

Получена Аррениусовская формула, описывающая величину задержки воспламенения в силаносодержащих смесях как функцию температуры и концентраций реагирующих компонент. Рассчитаны параметры Чепмена-Жуге детонационной волны при различных массовых долях конденсированной фазы. По общепринятой явной алгебраической формуле сделаны оценки размера ячейки газовой детонации и относительного размера детонационной ячейки в двухфазных смесях (рис.1). Полученные результаты, совместно с критерием предела распространения волны, связывающим размер ячейки с диаметром канала, использованы для оценки минимальной суммарной массы и пространственной протяженности облака частиц, которые необходимы для гашения спигового режима распространения детонации. Например, масса облака частиц, необходимая для подавления детонационной волны в стехиометрической силано-воздушной смеси в трубах с диаметром 10 см и 50 см равна 5.4 г и 1.04 кг, а геометрический размер облака составляет 160 см и 801 см соответственно.

Проанализировано влияние начального состава газа на эффективность подавления детонационной волны. Показано, что при изменении концентрации горючего относительный размер ячейки имеет минимум, соответствующий переобогащенным горючим смесям. При увеличении или уменьшении концентрации горючего относительно значения, соответствующего этому минимуму, относительный размер ячейки, и, соответственно, эффективность подавления волны растут.

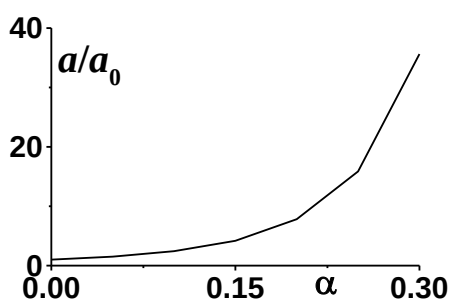


Рис.1. Относительный размер ячейки в стехиометрической силано-воздушной смеси с микрочастицами Al_2O_3 ; a_0 и a – размер ячейки в чистом газе и газе с частицами, $a_0=2\text{мм}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0645, СО РАН и ННС Тайваня и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература:

1. Fomin P.A., Chen J.-R. Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas // Combustion Science and Technology. – 2009. – Vol.181. – N8. – P.1038-1064.

**ТЕРМОДИНАМИКА И МЕХАНИЗМЫ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ
СЛОЖНО-КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ
С НОВЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ДОБАВКАМИ.
КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

Яновский Ю.Г.¹, Никитина Е.А.¹, Никитин С.М.², Карнет Ю.Н.¹

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина
МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва*

Методами квантовой механики (NDDO, PM3) в кластерном приближении исследовались термодинамика и механизмы реакций горения углеводородного топлива в присутствии добавок наноразмерных углеродных частиц. Расчеты показали, что присутствие углеродных добавок значительно улучшает качество и поднимает эффективность углеводородных топлив. Лучшими добавками являются графен и оксид графена.

Специальное исследование было посвящено термохимическим расчетам тепловых эффектов реакций сгорания и удельных теплот сгорания углеводородов с различной длиной цепи и ряда углеродных частиц. В качестве углеродных частиц рассматривались графен, его многослойные модификации, оксид графена, углеродные нанотрубки, аморфный углерод. Было показано, что рассчитанные удельные теплоты сгорания углеводородов уменьшаются, а, следовательно, эффективность топлива падает с ростом длины цепи углеводорода. Полученные теоретические данные для углеводородов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Из углеродных частиц наилучшие характеристики в качестве топлива имеет графен, а наихудшие – аморфный углерод.

Исследовалось влияние воды на реакцию горения топлив. При воспламенении водоземulsionного углеродного топлива молекулы воды разлагаются на протоны и гидроксилы, которые участвуют в процессе распада твердого углеродного топлива, существенно влияя на его термодинамику и улучшая качество топлива.

Согласно предложенному механизму, сжигание водоугольных суспензий осуществляется в две стадии, а именно, сначала происходят гетерогенные реакции с заряженными частицами, полученными из воды при высоких температурах поджига, и газификация, а затем сжигание полученных газов. По всей видимости, именно эти реакции приводят к снижению температуры воспламенения водоугольных суспензий по сравнению с исходным углеродным материалом. Синтезгаз, полученный на стадии газификации, увеличивает стабильность горения топлива.

Секция 4

Электрофизические и теплофизические процессы и технологии

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Великодный В.Ю.¹, Дыренков А.В.¹, Попов В.В.², Сон Э.Е.¹

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Плазменные методы позволяют очищать даже высокостойкие жидкие отходы. Особенно эффективны эти методы при больших процентных содержаниях органической примеси в жидкости [1]. При снижении концентрации органической примеси эффективность таких методов падает, и возрастают непроизводительные энергетические затраты. Поэтому необходимо привлекать другие методы переработки отходов дополнительно к плазменному оборудованию, что усложняет конструкцию. Альтернативой является создание разряда с существенной неравновесностью по электронной температуре, и соответственно, большего вклада энергии в коротковолновую часть спектра его излучения для увеличения выхода озона. Последнее позволяет эффективно дезактивировать следы органических отходов для достижения приемлемого ПДК. Для диагностики картины течения и горения разряда использовалась высокоскоростная камера с производительностью 500 тыс. кадров в секунду. Это позволило наблюдать течение разряда во времени. Из обработки кинограмм и вольтамперных характеристик было получено, что разряд протекает в сильно неравновесных условиях и генерируются сильные ударные волны. Применение девяти электродов позволяет увеличить производительность и глубину очистки по сравнению с одноэлектродной ячейкой. Развитие разряда по времени показано на рис.1.

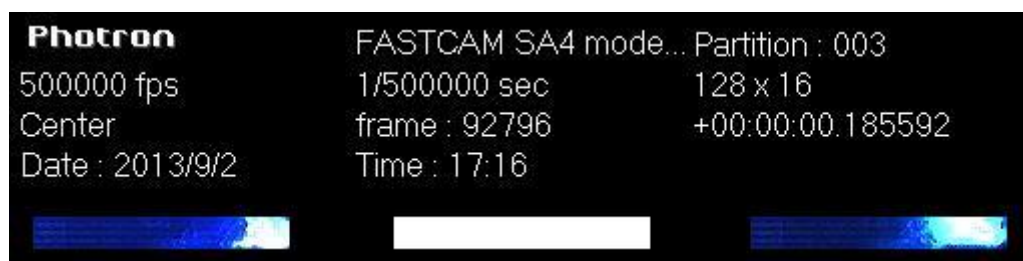


Рис.1. Три кадра из кинограммы разряда.

Откуда видно, что начальная скорость нарастания импульса превышает возможности даже высокоскоростной кинокамеры. Разработана методика измерения концентрации изопропилового спирта по температуре кипения, определены зависимости глубины очистки в зависимости от времени и начальной концентрации загрязнения.

Литература:

1. Великодный В.Ю., Беркова М.Д., Воротилин В.П., Гришин В.Г., Крыченко О.В., Попов В.В., Полотнюк О.Я., Рычагов Е.Н., Быков А.А., Добрынец Ю.В., Толкунов Б.Н. Плазменные технологии очистки сточных вод // Прикладная физика. – 2008. – №6. – С.105-110.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Глушнева А.В.^{1,2}, Савельев А.С.^{1,2}, Сон Э.Е.^{1,2}, Терешонок Д.В.^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет),

г. Долгопрудный

²ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния нагрева поверхности ramпы на отрыв и присоединение турбулентного пограничного слоя при обтекании ramпы в сверхзвуковом потоке $M=2$.

Для диагностики потока использовались Шлирен-метод и Particle Image Velocimetry (PIV). Сверхзвуковой поток формируется с помощью трубы СТ-4, в камере которой размещен угол сжатия. Угол представляет собой две плоскости, расположенные последовательно в камере. Крепление плоскостей позволяет менять наклон одной плоскости относительно другой. Температура обеих пластин варьируется при помощи электрического нагревательного элемента. Пластины формируют угол сжатия, который отклоняет поток на угол α . Значение угла α менялось в диапазоне от 15° до 30° .

Согласно теории на возникновение отрыва пограничного слоя в присутствии скачка уплотнения влияют только параметры натекающего пограничного слоя в области взаимодействия, при этом отрыв возникает, когда достигается критическое значение отношения давления внешнего потока к давлению в зоне отрыва [1]. Теория предсказывает зависимость возникновения отрыва от температурного фактора – отношения температуры поверхности к температуре внешнего потока T_w/T_∞ . Увеличение температурного отношения способствует отрыву. В [2] получено выражение для критерия отрыва, учитывающее влияние температурного отношения. Длина зоны отрыва определяется числами Маха и Рейнольдса набегающего потока и давлением за точкой реприсоединения пограничного слоя [3]. Согласно теории увеличение температурного отношения ведет к увеличению зоны отрыва.

Анализ шлирен-фотографий потока показывает, что размер оторвавшейся зоны пограничного слоя линейно увеличивается при увеличении T_w/T_∞ , как и предсказывает теория, но экспериментальные данные дают большую зависимость длины зоны отрыва от температурного фактора.

С помощью диагностического комплекса PIV были получены усредненные поля скоростей обтекания ramпы с углом 30° . Согласно полученным данным нагрев увеличивает температурное отношение увеличивает возмущения в реприсоединенном пограничном слое. Статистический анализ мгновенных полей векторов скоростей показывает, что нагрев поверхности приводит к увеличению флуктуаций зоны отрыва.

Литература:

1. Чжен П. Отрывные течения. – М.: Мир, 1973. – Т.1. – 334 с.
2. Захаров Н.Н. Влияние теплообмена на отрыв турбулентного пограничного слоя // Труды ЦИАМ. – 1971. – №507. – С.70-84.
3. Zheltovodov A.A., Shilein E.K., Horstman C.C. Development of separation in the region where a shock interacts with a turbulent boundary layer preturbed by rarefaction waves // Appl. Mech. Tech. Phys. – 1993. – Vol.5. – N3. – P.346-354.

МИКРОСТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ В ВОЗДУХЕ

Голуб В.В., Савельев А.С., Сон Э.Е.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Одним из наиболее перспективных методов управления течением воздуха вблизи поверхности летательного аппарата является использование плазменных актуаторов на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) [1]. Плазменный актуатор – простое электрическое устройство, способное передать неподвижному воздуху или набегающему потоку воздуха небольшой импульс вблизи его поверхности. За последние десять лет появилось множество публикаций, в которых представлены успешные эксперименты по затягиванию или даже предотвращению отрыва дозвукового потока воздуха от профиля крыла с ДБР плазменным актуатором [2]. Много внимания уделяется экспериментальному определению максимального импульса, передаваемого потоку воздуха, а также оптимизации работы ДБР актуатора и улучшению его характеристик. Данная работа посвящена исследованию течения вблизи поверхности актуатора, инициированного с помощью ДБР в неподвижном воздухе при атмосферном давлении, в начальный момент времени после подачи высокого напряжения на актуатор.

Визуализация течения проводилась оптическими методами диагностики – скоростной шлирен видеосъемкой и измерением поля скорости в потоке с помощью метода PIV. Для шлирен диагностики использовался теневой прибор ИАБ-451, оснащенный дуговой ксеноновой лампой в качестве осветителя и скоростной цифровой видеокамерой Photron FASTCAM SA4 в качестве фотоприемника. Актуатор размещался между коллиматором и приемником теневого прибора так, что поверхность актуатора была параллельна оптической оси прибора. Пространственное разрешение оптической системы составило около 0.1 мм.

Для PIV измерений актуатор помещался в герметичную камеру из диэлектрика, имеющую прозрачные секции для ввода лазерного ножа и съемки PIV-видеокамерой. Перед началом измерений рабочая камера заполнялась дымом. Измерения проводились с помощью измерительной системы LaVision 2D Planar PIV FlowMaster, дополнительно оснащенного микроскопом МБС-10 с переключаемым увеличением. При такой конфигурации оборудования удалось измерить распределение векторов скорости в потоке вблизи поверхности актуатора с пространственным разрешением в 70 мкм.

В работе экспериментально исследован процесс формирования воздушного течения вблизи ДБР-актуатора на начальном этапе после подачи высоковольтного напряжения. Измерены распределения скорости и получена картина течения в нестационарном случае. Получена зависимость скорости течения от напряжения. Проведено сравнение двух измерений картины течения, полученных с помощью разных оптических методов. Обнаружена сложная структура течения, которая характеризуется парой вихрей, величина завихренности в ядрах которых равны по модулю в каждый момент времени.

Литература:

1. Pietsch G. Peculiarities of dielectric barrier discharges // Contrib. Plasma Phys. – 2001. – Vol.41. – N1. – P.620-628.
2. Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – Vol.40. – N3. – P.605-636.

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИИ ЖИДКОСТЕЙ НА РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕЛЕЯ-ТЕЙЛОРА

Долуденко А.Н., Сон Э.Е.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Количество работ, связанных с неустойчивостями неньютоновских жидкостей невелико. Отсутствие заметной активности в этой области может быть частично объяснено трудностями, связанными с анализом стабильности, например, в вязкопластической жидкости. Из-за предела текучести неподвижное состояние жидкости всегда устойчиво по отношению к малым возмущениям. В этом случае классический подход на основе линейного анализа трудно применим.

Настоящая работа посвящена неустойчивости Релея-Тейлора вязкопластической, дилатантной и псевдопластической жидкостей. В качестве основной реологической модели, включающей эффекты вязкопластической жидкости, была выбрана модель Бингама. В численном моделировании рассматривается многомодовое возмущение поля скорости контактной границы двух сред. Главной целью работы было проведение численного моделирования перемешивания двух сред с различными реологиями, плотности которых отличаются в два раза, и получение взаимосвязи между развитием неустойчивости и характерными свойствами неньютоновских жидкостей.

В результате проведенных численных экспериментов неустойчивости Релея-Тейлора с многомодовым возмущением контактной границы было установлено, что режим перемешивания дилатантной жидкости сходен режиму перемешивания ньютоновской жидкости. Таким образом, соответствующие коэффициенты турбулентного перемешивания α имеют близкие значения. Рост ширины смешения полосы для вязкопластической и псевдопластической жидкостей значительно отличается от такового для ньютоновской жидкости. Можно видеть, что зависимость $h(Agt^2)$ не является линейной, а имеет квадратичную форму (рис.1).

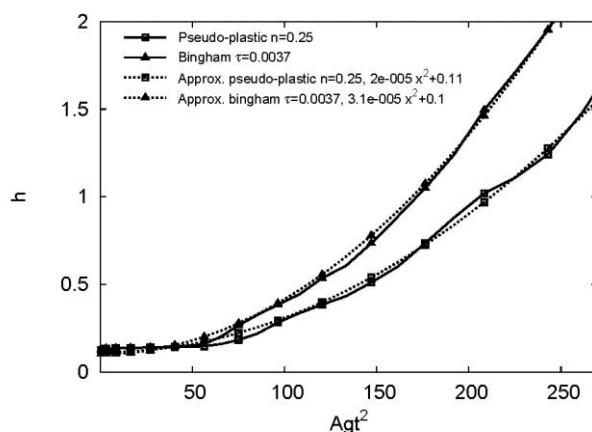


Рис.1. Зависимость ширины перемешивания h от величины Agt^2 для бингамовской ($\tau_0 = 0,0037$) и псевдопластической на больших временных интервалах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-01441.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА РЕШЕТКОЙ И В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ СОПЛЕ

Зибаров А.В.¹, Сон К.Э.²

¹*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный*

В работе представлены результаты численного моделирования на пакете GasDynamicTools (GDT) двух задач. Первая относится к турбулентному сверхзвуковому течению за решеткой. Это классическая задача, которая легла в основу теории однородной изотропной турбулентности А.Н.Колмогорова. Впервые измерения турбулентного поля за решеткой были проведены Прандтлем (теневые фотографии), затем были проведены термоанемометрические измерения Драйдена, которые были обработаны корреляционными функциями и М.Д.Миллионщиковым показано, что они соответствуют теории локально-однородной турбулентности и описываются уравнением Кармана-Ховарта. Позже в 1966г. подробные измерения были проведены Конт-Белло и Корсиным. В экспериментальной работе впервые были проведены измерения в сверхзвуковом потоке при числе Маха равном 2 перед решеткой. Эксперимент показал, что за решеткой на элементах цилиндрических элементах показали что в отличие от сверхзвукового случая турбулентное состояние образуется далеко за сеткой, где образуются ударные волны, которые затем пересекаются и в результате взаимодействия ударных волн образуется турбулентное состояние сжимаемого газа. Проведено сравнение численных результатов с экспериментами и получено согласие с ними. Эти первые результаты должны быть далее продолжены до построения полной теории сверхзвуковой турбулентности. Вторая задача численного моделирования относится к явлению перехода через скорость звука, предсказанную А.Г.Прудниковым (ОИВТ РАН) и экспериментально подтвержденным Третьяковым П.К. (ИТПМ СО РАН). Существо работы состоит в том, что обычно переход через скорость звука осуществляется в сопле Лаваля. Однако если взять цилиндрический канал с дозвуковым потоком, то вдувая струи с боковой поверхности цилиндра, можно сформировать газодинамическое сопло Лаваля, являющееся аналогом обычного сопла Лаваля. Такая задача была поставлена и решена численно на пакете GDT. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными и находятся в хорошем соответствии. Поучен разгон потока до чисел Маха 2. Настоящая часть работы представляет широкие возможности управления газодинамическими потоками.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКРУЧЕННОГО МЕТАНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

Крикунова А.И.^{1,2}, Савицкий Д.В.², Сон Э.Е.^{1,2}

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный*

²*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*

В работе проводился сравнительный анализ экспериментальных и расчетных результатов по измерению характеристик горения закрученного метано-воздушного потока. Характеристики пламени, такие как поля скоростей, напряжения Рейнольдса, получены при помощи стерео-PIV системы. Моделирование процессов горения проводилось с использованием программного пакета Flow Vision. В качестве объекта исследования было выбрано открытое закрученное метано-воздушное пламя. Экспериментальная установка состояла из баллонов с метаном и воздухом, системы расходомеров, емкости для предварительного смешения и горелки. В качестве горелки использовалось профилированное сопло Витошинского, позволяющее на выходе получать прямоугольный профиль скоростей (диаметр выходного отверстия 15 мм). Для создания закрученного потока в сопло помещался завихритель, представляющий собой центральную ось с прикрепленными наклонными лопатками. Закрутка S определялась из его геометрических параметров. Измерения проводились для сильнозакрученного пламени $S=1$. Газодинамические свойства потока определялись по объемному расходу воздуха, в десятки раз превосходившем расход метана, $Re=4100$. Коэффициент избытка топлива Φ рассчитывался как отношение мольной доли топлива в эксперименте к мольной доле для стехиометрического состава смеси, $\Phi=0,7; 1,4; 2,5$. Эксперименты выполнялись при атмосферном давлении и комнатной температуре. Стерео-PIV система, состояла из сдвоенного 130 mJ Nd:YAG импульсного лазера (длительность импульса около 10 нс), двух 4 Mpix ПЗС камеры, расположенных под углом $\pm 30^\circ$ относительно плоскости измерения, и синхронизатора. Поток газоз-воздушной смеси засеивался частицами TiO_2 со средним диаметром около 1 мкм. На объективы скоростных видеокамер были установлены поворотные объективы типа Шеймпflug, позволяющие фокусировать на плоскость матрицы объект, наблюдавшийся под углом относительно оси камеры. Для калибровки оптической системы использовалась трехмерная калибровочная мишень размером 50×50 с опорными точками-окружностями на декартовой сетке с шагом 3 мм. С целью подавления свечения пламени камеры были оснащены узкополосными оптическими фильтрами (532 нм). В измерительной области толщина лазерного луча была около 1 мм, что достигалось использованием системы цилиндрической и фокусирующей линзы. Система управлялась при помощи программного обеспечения "Actual Flow". Для каждого режима горения было рассчитано 3000 мгновенных трехкомпонентных полей скорости. Полученные изображения обрабатывались при помощи итерационного кросскорреляционного алгоритма с деформацией изображения и конечным размером расчетной области 32×32 pix и 50% перекрытия. В ходе эксперимента были получены поля. Получены поля мгновенных скоростей, средних, и пульсаций скоростей. Экспериментальные и расчетные данные имеют хорошее совпадение.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Куликов Ю.М., Сон Э.Е.

*Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный*

К термовязким следует отнести жидкости, обладающие аномальной зависимостью вязкости в некотором интервале температур. Подобные среды уже долгое время привлекают внимание исследователей [1,2], т.к. их изучение обязательно требует совместного решения уравнения теплопроводности и уравнения Навье-Стокса. С другой стороны, термовязкость может оказать решающее влияние на характеристики течений. Термовязкостью обладают различные классы органических и неорганических веществ: жидкая среда, расплавы полимеров, магматические расплавы, минеральные и синтетические масла, органические масла. Учет аномальной температурной зависимости вязкости необходим для получения достоверных гидродинамических и тепловых расчетов, конструирования эффективных и надежных устройств.

Затронутая тематика важна и для развития естественнонаучных исследований в области физики планет. По своей природе термовязкость тесно связана с химическим строением вещества, т.к. её проявление особенно сильно в зоне прохождения химических реакций, а также в зонах фазовых переходов.

Авторами установлено влияние термовязкости на форму профиля скорости в плоскопараллельном установившемся течении жидкости. Отличительной особенностью полученного решения является возможность появления точки перегиба профиля, что, в соответствии с теоремой Релея, является необходимым условием неустойчивости течения.

Таким образом, важной задачей становится анализ устойчивости течения по отношению к малым колебаниям на основе обобщения уравнения Орра-Зоммерфельда [3] для термовязкой жидкости. Результатом работы стало определение областей устойчивости и критического числа Рейнольдса.

Литература:

1. Урманчеев С.Ф. Гидродинамические эффекты в аномально термовязких средах и пористых сферах / Дис. док. физ.-матем. наук. – Уфа, 2004. – 277 с.
2. Медведицков А.Н. Вязкость жидкой серы и бинарной системы сера-иод в диапазоне 350...1000 К / Дис. канд. техн. наук. – М.: ИВТАН СССР, 1984. – 135 с.
3. Иногамов Н.А., Демьянов А.Ю., Сон Э.Е., Гидродинамика перемешивания. – М.: Изд-во МФТИ, 1999. – 464 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ДВУХФАЗНЫХ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ

Панов В.А., Сон Э.Е.

*Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный*

Развитие искрового разряда хорошо изучено в чистых жидкостях при различной длительности импульсов [1,2]. Интерес к разрядным процессам в двухфазных средах связан с перспективностью их использования для очистки и обеззараживания различных жидкостей. До настоящего времени, в основном, исследовалось влияние одиночных микропузырьков на развитие искры и почти не исследовано влияние большого количества микропузырьков, равномерно распределенных в объеме жидкости, на развитие пробоя и последующую динамику проводящего канала. В настоящей работе исследовано развитие искрового разряда в водопроводной воде с микропузырьками, распределенными по всему объему. Микропузырьки создавались путем подачи сжатого воздуха через микропористую мембрану. Для формирования разряда использовалась генератор импульсных напряжений, состоящий из емкостного накопителя и управляемого газового разрядника. Разрядная камера представляла собой вертикально ориентированную кварцевую трубку с закрепленными в ней электродами. Высоковольтный электрод выполнен в виде стержня с конусным наконечником, земляной – в виде цилиндра с закругленным концом. Регистрация напряжения и тока разряда осуществлялась с помощью 4-х канального осциллографа Tektronix DPO 7054C. Одновременно велась скоростная съемка камерой RedLake MotionPro X3. Включение записи было синхронизовано с подачей импульса разрядного напряжения.

Эксперименты показали, что развитие разряда проходит в несколько этапов. При растекании тока от острого анода в жидкость вначале происходит формирование импульсной стримерной короны, затем наблюдается образование локальной плазменной области и прорастание плазменного канала от анода к катоду. При замыкании разрядного промежутка наблюдается резкий рост тока и горение дугового разряда. Сравнение осциллограмм и полученных фотографий разрядного процесса для жидкости с пузырьками и без пузырьков выявило следующие особенности: Наличие большого количества микропузырьков снижает время задержки пробоя приблизительно в два раза во всем диапазоне прикладываемых напряжений. Для жидкости без пузырьков ВАХ состоит из двух почти линейных участков. Наличие микропузырьков задает на начальном участке ВАХ отрицательное дифференциальное сопротивление. Это свидетельствует о развитии ионизационно-перегревной неустойчивости вблизи анода.

Пробойное напряжение в микропузырьковой жидкости превышает аналогичное значение для жидкости. Наличие достаточно сильного электрического поля приводит к увеличению начального тока за счет частичных разрядов в микропузырьках, развитию тепловой неустойчивости и формированию хорошо проводящего плазменного канала.

Литература:

1. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – С.155.
2. Bruggeman P, Leys C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – Vol.42.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА В ТЕОРИИ АДсорбЦИОННОГО СЛОЯ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ЕЕ ДЕФОРМАЦИИ

Подгаецкий Э.М.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Объяснение П.А.Ребиндером открытого им же [1] эффекта снижения поверхностной твердости тела адсорбцией на его поверхности активного вещества (ПАВ) вначале подтвердилось в ранних работах теорией приращения $\Delta\sigma$ поверхностного натяжения, основанной на формуле для поверхностного натяжения Шишковского. В дальнейшем, однако, выяснилось, что адсорбция ПАВ может и понижать (положительный эффект) и повышать (отрицательный эффект) поверхностное натяжение и знак этого приращения также зависит от природы и адсорбента и адсорбата и даже от его концентрации.

Предложенная ранее теория однокомпонентной адсорбции из жидкости на твердой поверхности с учетом ее деформации [2] позволила вывести аналитически приращение $\Delta\sigma$ в линейном по величине деформации ϑ приближении, т.е. при малых ϑ . Полученное выражение $\Delta\sigma$ содержит знакопостоянный (отрицательный) член $\Delta\sigma_a$, напрямую связанный с изотермой равновесной адсорбции

$$\Delta\sigma_a = - \int_0^\Gamma \Gamma \frac{A'}{A} d\Gamma < 0 \quad (1)$$

где $A' \equiv \frac{dA}{d\Gamma}$, а функция $A(\Gamma)$ определяется уравнением изотермы адсорбции на недеформированной поверхности при одном значении потенциала φ_0

$$Bc \Big|_{\substack{\vartheta=0 \\ \varphi=\varphi_0}} = A(\Gamma)$$

и при равновесной адсорбции является возрастающей функцией ($A' > 0$); c , Γ – безразмерные объемная и поверхностная концентрации адсорбата, $B \equiv const$.

Выведенное выражение для $\Delta\sigma$ позволяет также описывать величину дополнительного удлинения растянутого образца, получаемого при тех же нагрузках, но после нанесения на поверхность адсорбата, т.е. эффект Ребиндера в его второй формулировке – «облегчение деформации».

Литература:

1. Ребиндер П.А. «VI съезд русских физиков». – М.: ОГИЗ, 1928. – С.29
2. Подгаецкий Э.М. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – №7. – С.97.

О МЕТОДЕ ФУНКЦИЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНОГО СМЕШЕНИЯ И ГОРЕНИЯ

Сон Э.Е.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва
Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный*

В теории и численном моделировании турбулентных течений широко используются моментные методы для замыкания уравнений турбулентности. Развита как моментные методы для уравнений Рейнольдса (k-ε, RANS), так и методы крупных вихрей (LES), так и прямое численное моделирование турбулентности (DNS), однако, в настоящее время они ограничены числами Рейнольдса, определяемыми числом узлов сеток по каждому направлению $Re = N^{4/3}$. Задачи турбулентного смешения и горения тем более не могут быть описаны моментными методами. Альтернативным методом является метод описания турбулентных полей методами функций плотности вероятности. Уравнения для функций плотности вероятности (ФПВ) в теории турбулентности впервые были введены А.С.Мониным, который получил уравнение для ФПВ скоростей в турбулентном потоке. Следующий важный шаг был сделан В.М.Иевлевым, который получил уравнение для ФПВ для произвольной скалярной или векторной величины в турбулентном потоке. Экспериментальные измерения ФПВ были впервые выполнены в МФТИ по предложению Е.С.Щетинкова Ю.А.Щербиной и С.Недуробом. В задачи микросмешения значительный вклад внес В.А.Фрост. В докладе изложены методы описания полей для ламинарных и турбулентных полей и предложена программа описания турбулентных полей на основе уравнений для ФПВ и аналогии с кинетической теорией газов. В кинетической теории газа исходным является уравнение Лиувилля, которое представляет уравнение непрерывности в $6N$ -пространстве для ансамбля частиц. Из кинетического уравнения умножением на различные степени скорости частицы и интегрированием по скоростям (усреднением по скоростям) получается система уравнений моментов для скоростей, которая затем решается различными методами (например, методом Грета) для нахождения транспортных коэффициентов.

Уравнения, описывающие турбулентное движение, как неоднократно подчеркивалось, имеют много общего с кинетическими уравнениями для газа взаимодействующих частиц. В турбулентном потоке число степеней свободы определяется числом Рейнольдса $N \propto Re^{9/4}$, а для газа, как системы N частиц, оно пропорционально N^3 . В теории турбулентности исходными являются уравнения Навье-Стокса, которые представляют локальные уравнения движения "жидкой частицы". Метод получения уравнений в теории турбулентности состоит во введении ансамбля статистически эквивалентных потоков, для которых выделяются регулярные составляющие (средние значения параметров), а для пульсационных составляющих умножением уравнения для пульсационной составляющей например, скорости, на пульсационную скорость и осреднением по ансамблю получается цепочка уравнений Фридмана-Келлера, в которой уравнение для s -частичного момента содержит в правой части $s + 1$ момент скоростей. Помимо внешней аналогии цепочки уравнений Фридмана-Келлера в теории турбулентности и цепочки уравнений для моментов скоростей в методе Грета, существует более глубокая аналогия между кинетической теорией и теорией турбулентности. Решение многих задач в кинетической теории основано на наличии малого параметра – числа Кнудсена, равного отношению характерного кинетического времени (времени свободного

пробега), за которое устанавливается равновесное распределение (в большинстве задач – максвелловское) частиц по скоростям, к характерному гидродинамическому, имеющему порядок времени изменения гидродинамических (средних) параметров. На гидродинамической шкале времени происходит медленная эволюция средних параметров при сохранении микроскопического распределения частиц по скоростям.

Рассматриваются методы описания смешения и горения, которые должны быть дополнены методами расчета поля средней скорости и параметров турбулентности. Проведено сравнение расчетов полей на основе уравнений Навье-Стокса, состояния, диффузии и энергии с учетом возможных химических процессов и переменности параметров среды: теплоемкости, коэффициентов переноса. Рассмотрено влияние турбулентности на процесс смешения компонентов и горения на микросмешение. В тоже время гипотезы о микросмешении эквивалентны заданию скалярной диссипации, используемой в различных полуэмпирических моделях турбулентности.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Сон Э.Е., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Савицкий Д.В.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Данная работа посвящена исследованию теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности при помощи программного комплекса FlowVision. Пакет FlowVision позволяет рассчитывать сложный сопряженный теплообмен в различном промышленном оборудовании с высокой точностью. В более ранних работах были проведены расчеты теплообмена трансформаторов Siemens, VIT и показано хорошее соответствие результатов расчета на FV и данных других авторов. В настоящий момент активно ведутся исследования и разработки, позволяющие обеспечить взрывобезопасность трансформаторов. Однако изменения в конструкции, необходимые для обеспечения взрывобезопасности трансформатора, могут приводить к ухудшению работы трансформатора в нормальном режиме. Например, повышение температуры, вызванное ухудшением теплообмена, может привести к ускорению деградации электроизолирующих материалов. В данной работе исследовано конструктивное решение, основанное на введении статических элементов, защищающих трансформатор от взрыва. Проведены расчёты конвекции и теплообмена в моделях высоковольтного маслонаполненного трансформатора IV габарита.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД КАК АЛЬТЕРНАТИВА ДБР ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Терешонок Д.В.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Изучение возможности активного управления газодинамическим течением вблизи поверхности летательного аппарата интенсивно исследуется на протяжении последних нескольких десятилетий. Интерес в данной области связан с перспективами создания летательных аппаратов, основная часть полета которых протекает в диапазоне высот нескольких десятков км.

В настоящее время в качестве инструмента для активного управления потоком рассматривается газовый разряд. При этом воздействие на газодинамическое течение может быть как тепловым – за счет создания тепловых потоков в пограничном слое, так и плазменным – за счет ионного ветра, созданного объемным зарядом. В настоящей работе изучается именно плазменное воздействие.

В литературе широко представлены как экспериментальные, так и расчетно-теоретические работы по управлению газодинамическим потоком с помощью диэлектрического барьерного разряда (ДБР) [1-3], искрового разряда [4-5], высокочастотного разряда [6], тлеющего разряда [7].

С точки зрения плазменного управления наибольший интерес представляют те типы разрядов, в которых воздействие на поток происходит непосредственно вблизи обтекаемой поверхности. Это, например, ДБР и поверхностный тлеющий разряд (электроды располагаются на одной поверхности). Одна из основных особенностей таких разрядов – сильное электрическое поле и большой объемный заряд вблизи электродов. Преимущество их использования обусловлено тем, что область воздействия в значительной степени находится внутри пограничного слоя, обеспечивая максимальный эффект так как выделяемая энергия не уносится основным потоком.

В настоящей работе представлены результаты двухмерного численного моделирования поверхностного тлеющего разряда постоянного тока в молекулярном азоте с целью выработки рекомендаций по реализации такого типа разряда в аэрофизических приложениях.

Литература:

1. Boeuf J.P., Pitchford L.C. // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol.97. – N10. – P.103307.
2. Moreau E. // J. of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Vol.40. – P.605.
3. Jukes T.N., Choi K.-S. // Exp. Fluids. – 2012. – Vol.52. – N2. – P.329.
4. Son E., Tereshonok D. // EPL. – 2012. – Vol.99. – P.15002.
5. Голуб В.В., Савельев А.С., Сеченов В.А., Сон Э.Е., Терешонок Д.В. // ТВТ. – 2010. – Т.48. – №6. – С.945.
6. Завершинский И.П., Климов А.И., Макарян В.Г., Молевич Н.Е., Моралев И.А., Порфирьев Д.П. // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37. – Вып.23. – С.3.
7. Суржиков С.Т. // ТВТ. – 2005. – Т.43. – №6. – С.828.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПОДОГРЕВА СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ

Юсупов Д.И.¹, Тюфтяев А.С.¹, Филиппов Г.А.², Пак Ю.А.²

¹*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва*

²*ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П.Бардина», г. Москва*

Применение генератора плазмы для дополнительного тепловложения в металл в промежуточном ковше МНЛЗ на зарубежных металлургических предприятиях началось в 80-е годы прошлого века. В нашей стране в 2011-м году впервые на ОАО «ММК» произведён монтаж, наладка и опытно-промышленное опробование установки плазменного подогрева стали в промковше УНРС, разработанной Объединённым институтом высоких температур РАН и ФГУП ЦНИИЧермет.

Генератор плазмы (плазмотрон) рассчитывался на мощность 750 кВт. Расчётный ток, протекающий через плазмотрон – 4000 А, падение напряжения через всю цепочку – плазмотрон-анод – расплав – плазмотрон-катод – 350 В, плазмообразующий газ – аргон, расход аргона – 4 г/с.

Основная проблема, препятствующая созданию данного плазмотрона, – пониженный ресурс электродной вставки плазмотрона-анода. Материал эмиссионного наконечника – медь без вольфрамовой вставки. Испытания показали, что более устойчива к высоким токам вставка с цилиндрическим углублением посередине и шипом внутри, который необходим для увеличения скорости потока охлаждающей воды. Кроме того, увеличить ресурс работы и устойчивость анодной вставки к большим токам позволило вращение анодного пятна по поверхности вставки. Вращение происходило за счёт придания тангенциальной составляющей скорости плазмообразующего газа с помощью специальным образом расположенных отверстий во фторопластовом изоляторе.

УППС представляет собой сложный комплекс электротехнического и механического оборудования, состоящий из водоохлаждаемых плазмотронов специальной конструкции, расположенных на поворотных консолях, систем обеспечения, контроля, управления и защит. Промковш, использовавшийся для подогрева стали, имел специальную конструкцию с камерами подогрева.

Испытания показали, что плазменный подогрев в промковше заметно увеличивает температуру расплава в процессе разливки уже при мощностях около 30% (300 кВт на каждый плазмотрон) от расчётной мощности установки (1 МВт на плазмотрон). Замер температуры металла в промковше показал, что при скорости разливки 5 т/мин металл на данной мощности работы УППС подогревался на 3-5°C.

Секция 5

Вычислительные методы механики наноструктурированных и гетерогенных сред

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ И МОМЕНТОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ПОСАДОЧНОГО УСТРОЙСТВА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ПРОЦЕДУРА ИХ РЕШЕНИЯ СОВМЕСТНО С УРАВНЕНИЯМИ ДВИЖЕНИЯ

Бакулин В.Н.¹, Воронин В.В.², Борzych С.В.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева»,
Московская область, г. Королев*

Одним из ключевых и наиболее критичных этапов полета космического аппарата (КА) является его посадка на поверхность планеты от первого контакта до полной остановки. Поскольку при первом ударе и дальнейшем движении в элементах посадочного устройства КА возникают чрезвычайно высокие динамические нагрузки, передающиеся непосредственно на корпус КА, определение этих нагрузок с целью проведения в дальнейшем прочностного анализа является одной из основных целей моделирования процесса посадки.

Наиболее универсальным и практически удобным представляется подход к созданию динамической модели процесса посадки, при котором корпус КА и элементы его посадочного устройства рассматриваются как система тел со специфическими внутренними связями. Посадочное устройство включает тарелки, непосредственно контактирующие с грунтом посадочной поверхности, стойку, содержащую деформируемый демпфирующий элемент, и подкосы, соединяющие корпус КА с тарелью либо со стойкой. Каждое из этих тел условно рассматривается как свободное, а их взаимодействие учитывается в виде сил либо моментов реакций связей в зависимости от того, какая степень свободы – линейное или угловое перемещение – запрещается данной конкретной связью.

Уравнения движения каждого выделенного тела содержат в правых частях уравнений, помимо внешних по отношению к данному телу силовых факторов, формально записанные главные вектора сил и моменты реакций связей. В силу этого автономное независимое интегрирование уравнений движения невозможно без определения сил и моментов реакций связей, для чего записывается специальная система уравнений связей. Таким образом, динамическая модель процесса посадки включает неразвязанную систему уравнений движения и уравнений связей.

В рамках такого подхода возможна разработка эффективного алгоритма процедуры их совместного решения. Поскольку уравнения движения всех тел записываются единообразно в универсальной форме (отличие лишь в конкретной структуре главных векторов сил и моментов реакций связей), подход открывает большие возможности алгоритмизации и формализации. Структура главных векторов сил и моментов реакций связей формируется по простым и ясным признакам: каждой связи ставится в соответствие управляющий вектор размерностью 1:6 (по числу возможных степеней свободы), ненулевые элементы которого определяют ограничения, налагаемые данной связью, а, следовательно, наличие соответствующей компоненты силы либо момента реакции связей. Главные вектора формируются суммированием по числу связей, наложенных на данное тело системы.

Такой алгоритм позволяет гибко формировать расчетную динамическую схему посадочного устройства любой конкретной конструкции и пространственной конфигурации. На базе данного подхода разработан специализированный программный комплекс для расчета процесса посадки КА с различными типами посадочных устройств – пружинно-рычажных, рычажно-тросовых, на отводимый шит.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований
- грант № 13-01-00853-а.*

Литература:

1. Бакулин В.Н., Борzych С.В., Воронин В.В. Анализ динамики процесса посадки космического корабля с рычажно-тросовым посадочным устройством / IV-й Всероссийский симпозиум «Механика композиционных материалов и конструкций». Сборник тезисов докладов. – М.: ИПРИМ РАН, 2012.

ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕБУЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ В ВАРИАЦИОННОЙ ПОСТАНОВКЕ

Бакулин В.Н.¹, Гусев Е.Л.²

¹ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

²ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

В связи со все возрастающим применением в приборостроении, авиационной и космической технике структурно-неоднородных материалов, конструкций, покрытий важное значение приобретает разработка и совершенствование численных методов расчета и оптимального синтеза конструкций из композиционных материалов [1]. Современные конструкции должны удовлетворять широкому комплексу требований, связанных с ограничением на вес, стоимость, прочность, жесткость, надежность, стойкость к воздействию дестабилизирующих факторов различной физической природы и многим другим. Поэтому проблеме оптимального проектирования конструкций уделяется значительное внимание.

Применение оболочечных конструкций, особенно слоистой структуры, обеспечивает сочетание высокой несущей способности с малой массой. Слоистая структура обеспечивает также достижение необходимых тепло-, звуко-, виброизоляционных и других важных свойств. Это актуально для конструкций ракетно-космической, авиационной, судостроительной и многих других отраслей современной техники.

В представленной работе рассматриваются задачи оптимального проектирования структурно-неоднородных композиционных материалов и конструкций с требуемым комплексом свойств в вариационной постановке.

На основе теории многозначных отображений разработана методика продолжения решения по параметру, позволяющая осуществлять эффективное продолжение множества глобально-оптимальных решений опорной задачи синтеза по параметру.

Разработанная методика исследования предельных возможностей, основанная на теории многозначных отображений и методах продолжения по параметру, позволяет осуществлять эффективное конструирование слоисто-неоднородных структур со сложными характеристиками при волновых воздействиях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант № 13-08-00229.

Литература:

1. Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций. В 2 т. Т.1. Бакулин В.Н., Гусев Е.Л., Марков В.Г. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. – М.: Физматлит, 2008. – 256с.

КРИТЕРИЙ АДАПТАЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ ПРИ МОНОТОННОЙ СХОДИМОСТИ

Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

При решении прикладных задач математической физики характерной является большая неравномерность пространственного распределения компонент решения. При использовании дискретных методов (в частности, рассматриваемого далее метода конечных элементов) зоны с большими градиентами приводят к необходимости либо повышать порядок аппроксимации искомых параметров внутри конечных элементов, либо уплотнять сетку разбиений. Известно доказательство сходимости метода в пространстве L_2 , когда характерный размер конечного элемента $h \rightarrow 0$. В [1] показано, что соответствующая связь для величины обратной характерному размеру конечного элемента – плотности конечно-элементной сетки $t \rightarrow \infty$ означает независимость решения от разбиения задачи. При удовлетворении близости дискретного решения к предельному по некоторому критерию можно говорить о локальной адаптации сетки. Далее рассмотрена реализация предложенной в [1] аппроксимации распространенного в конечно-элементных задачах случая монотонной сходимости

$$fm(t) = fm(\infty)(1 - e^{-\gamma t}),$$

где $\gamma > 0$ – некоторый параметр сходимости.

Калибровочная функция $fm(t)$ использована для функциональной интерполяции значений выбранной функции $Y(t)$ с условиями в узлах: $Y(t_k) = fm(t_k)$. При этом можно считать коэффициенты $\gamma_k, fm_k(\infty)$ локально-постоянными на промежутках $[t_{k-1}, t_k]$. Показано, что последовательность значений $fm_k(\infty)$ сходится к тому же пределу $fm(\infty)$ и позволяет дать заключение о близости дискретного решения $Y(t_k)$ к предельному.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант № 13-01-00982-а.

Литература:

1. Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В. Оценка локальных параметров сетки в конечно-элементных задачах // Вычисл. мех. сплошн. сред. – 2013. – Т.6. – №1. – С.70-77.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕД В РЕЖИМЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Басистов Ю.А., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Режим конечных деформаций характеризуется нелинейной зависимостью напряжения в вязкоупругой среде от градиента деформации. В настоящее время, как правило, нелинейные модели представляются в виде нелинейных дифференциальных, или интегральных уравнений. Однако в таких моделях фактический вид нелинейности неизвестен и способы оценки этой нелинейности по экспериментальным данным не определены.

В настоящей работе приводится исследование динамической нейросетевой модели, предложенной авторами ранее, для изучения качества идентификации модели к напряжённно-деформационному поведению реального композита ПИ-330 в режиме конечных деформаций. Произведена процедура обучения модели для эксперимента с градиентом деформации $\gamma=1$. Показано, что система достигла заданного качества обучения, равного 0.001 за 11 секунд при 100 нейронах в рекуррентном слое на процессоре INTEL CORE i7. Произведено тестирование модели для исследования свойств обобщения обучающего материала. Показано, что при подаче на вход сигнала, не принадлежащего обучающей выборке, на выходе модели воспроизводился сигнал, почти всюду совпадающий с экспериментальным сигналом в равномерной метрике. Модель способна к обобщению обучающего материала. Последнее свойство не доступно для моделей на основе интегральных и дифференциальных уравнениях. Показано, что модель воспроизводит функцию нелинейной зависимости величины амплитуды касательных напряжений от амплитуды градиента деформации. Приведённые графики нелинейной функции полностью совпадают с экспериментальными графиками. При этом никакой дополнительной априорной информации о виде и свойствах нелинейности не требуется. Заметим, что подобный график, воспроизведённый нелинейной интегральной моделью с факторизацией функции нелинейности, ранее изучавшийся авторами, отклоняется от аналогичного экспериментального графика. Последнее также подтверждает преимущество нейросетевой модели перед нелинейными феноменологическими моделями на основе интегральных и дифференциальных уравнений.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АСИМПТОТИЧЕСКОГО УСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ С БЫСТРООСЦИЛЛИРУЮЩИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

В работе развивается метод асимптотического усреднения для нелинейных уравнений термоупругости с быстроосциллирующими коэффициентами, соответствующими структурно-неоднородным материалам с нелинейными свойствами, имеющими внутреннюю микроструктуру, обусловленную наличием периодической системы включений с промежуточным межфазным слоем. В отличие от традиционного подхода к методу асимптотического усреднения, помимо двух типов переменных – быстрых и медленных – при асимптотическом анализе уравнений вводится ещё дополнительный набор параметров, соответствующих нелинейным зависимостям свойств материала от напряжений и температуры. Соответственно функции быстрых переменных рассматриваются в параметрическом пространстве. В результате эффективные характеристики структурно-неоднородного материала имеют нелинейную диаграмму состояния, для расчёта которой требуется эффективный метод решения задачи на ячейке периодичности при множественном варьировании дополнительного набора параметров.

Для решения нелинейного усреднённого уравнения для функций медленных переменных применяется метод конечных элементов. Для решения вспомогательных задач на ячейке для функций быстрых переменных применяется специальный аналитико-численный метод, являющийся вариантом метода наименьших квадратов на блочной структуре, основанный на аппроксимациях решения функциями формы высокого порядка, точно воспроизводящими все условия сопряжения на границах раздела фаз. В целом, такой метод решения задачи усреднения нелинейных уравнений с быстроосциллирующими коэффициентами является весьма эффективным и позволяет с высокой точностью определять как глобальные (нелинейная диаграмма состояния усреднённого материала), так и локальные (например, внутренние микронапряжения) характеристики неоднородной среды.

Изложенный подход к моделированию структурно-неоднородных материалов был численно реализован в программных комплексах UWAY и BCM, и применялся, в частности, для моделирования эффекта локального аномального усиления в почти несжимаемых материалах с наполнителем в виде шунгитовых наночастиц.

Литература:

1. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Усреднение нелинейного уравнения теплопроводности при моделировании распространения тепла в композитных материалах периодической структуры // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. – Т. 19. – №2. – С.163-180.
2. Волков-Богородский, Д.Б. Власов А.Н. Моделирование уравнений конвективного переноса тепла в структурно-неоднородных средах методом двухмасштабного усреднения / IV-й Всероссийский симпозиум «Механика композиционных материалов и конструкций». Сборник трудов. – М.: ИПРИМ РАН, 2012. – Том II. – С.186-203.

МЕТОД МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПАРАЛЛЕЛИЗМА В МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ СТРУКТУР

Герсга А.Н.¹, Остапкевич М.Б.²

¹Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

²ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, г. Новосибирск

Интересные перспективы в исследовании перколяционных структур имеет подход, базирующийся на алгоритмах с мелкозернистым параллелизмом (МЗП). Суть метода сводится, как известно, к отысканию таких трансформаций постановки исходной задачи, ее содержательного или аналитического описания, которые превращают алгоритм решения в совокупность пространственно распределенных, параллельно выполняемых, достаточно примитивных массовых вычислительных процессов. Привлекательность подхода объясняется возможностью отыскания оптимальных (например, по временным характеристикам) алгоритмов решения сложных, а также громоздких и трудоемких задач. Кроме того, подход позволяет создавать эффективные параллельные программные реализации этих алгоритмов на современных высокопроизводительных вычислительных системах.

Развитием реализации МЗП-алгоритмов является система WinALT, ключевые достоинства которой – возможность конструирования алгоритмов и структур с разнообразными видами МЗП, и визуальный подход в описании правил преобразований данных в моделях. В докладе описаны базовые положения создаваемого на базе WinALT программного комплекса ОДНО.

Важными особенностями комплекса являются специализированный синтаксис для аналитического описания моделей перколяционных систем, и специфические возможности при работе с массивами: планируется, что они будут содержать иерархию подмассивов, между которыми будут действовать разные типы отношений, определяться радиус взаимовлияния с соседними, направления действий, спектр свойств и другое.

Для описания структуры и свойств перколяционных систем в программном комплексе используются статистические, геометрические и физические параметры. К последним относятся, в частности, радиус гирации и степень анизотропии кластеров, критические индексы, размерности Реньи, длина связности, кластерная мощность и индекс ее роста, лакуарность, энтропия и другие.

Одной из особенностей программного комплекса является возможность исследования строения стохастических связанных областей в n -мерных фазовых пространствах свойств кластерных систем и материалов, в которых они расположены.

Возможности программы планируется использовать для изучения структуры и свойств перколяционных кластеров различных модификаций, а также для исследования мезоскопической структуры широкого класса гетерогенных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЕННОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЦИРКОНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Данилова О.Т.

Омский государственный технический университет, г. Омск

Несомненным достоинством процессов в струйно-плазменных реакторах является относительная простота и возможность использования неподготовленного сырья, например, пылевидных флотоконцентратов, легкость организации непрерывного процесса, управления и автоматизации.

Модель представлена в виде системы уравнений, которые описывают в целом весь процесс плазменной обработки полидисперсного материала через ряд подсистем, характеризующих стадии процесса, что позволяет проводить расчеты значений:

- температуры реакции разложения вещества сложного состава как параметра, характеризующего равновесное состояние исследуемой системы;
- режимов процесса тепло - и массопереноса вещества;
- температуры центра и поверхности частицы заданного диаметра на текущем шаге времени;
- теплоемкости, электропроводности, вязкости, равновесной температуры плазмы;
- баланса мощностей в задаваемом диапазоне температур.

При задании типа обрабатываемого материала происходит инициализация внутренних переменных необходимых для проведения расчетов. Поиск расчетного значения температуры реакции разложения вещества сложного состава T_{PAB} происходит в диапазоне от начальной до максимальной температуры с шагом ΔT . Расчет равновесной температуры химической реакции восстановления производится через определение изменений изобарно-изотермического потенциала.

В экспериментальной части работы были использованы варианты с комбинацией трех газовых сред – воздух, азот, пропан-бутан, а также четыре различных геометрии плазменного реактора – с конусной и цилиндрической трехструйными камерами смешения различного диаметра.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в соответствии с результатами модельного представления, процесс разложения цирконового концентрата происходит по механизму твердофазной термической деструкции исходного сырья на отдельные фазы ZrO_2 (моноклинной, тетрагональной и кубической структуры) и SiO_2 . В лучших пробах достигнута глубина переработки до 93% по исходному сырью и средняя дисперсность продукта 140-180 нм. Позитивным фактором для получения глубины переработки и качества продукта является наличие в реакторе углеводородной составляющей. При этом значительно подавлялась тенденция продукта к осаждению на стенки реактора. Тем не менее, проблема настылеобразования на стенках реактора требует специальных технических решений при проектировании промышленной установки. Был показан также положительный эффект от уменьшения дисперсности перерабатываемого сырья. Так, использование фракции 5-10 мкм (вместо исходного сырья с размером частиц 40-70 мкм) позволяет увеличить глубину переработки и способствует снижению дисперсности готового продукта.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Долгодворов А.В.¹, Чекалкин А.А.²

¹ОАО «Уральский НИИ композиционных материалов», г. Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Рассмотрен углерод-углеродный материал, где пространственное армирование образовано системой углеродных нитей утка и основы ткани с последующей прошивкой пакета в перпендикулярном направлении высокопрочной низко модульной углеродной нитью. Основные технологические переделы при изготовлении углерод-углеродного композиционного материала включают следующие этапы: получение углепластика, карбонизация углепластика, высокотемпературная обработка карбонизованного углепластика, получение углерод-углеродного композиционного материала.

Среди отличительных свойств материала можно выделить возможность изготовления деталей сложной формы, часто без проведения дополнительной механической обработки, так же стоит отметить, что материал идеально подходит для изготовления тонкостенных несущих элементов конструкций летательных аппаратов в условиях высокотемпературного внешнего воздействия.

Одной из актуальных проблем изготовления конструкций из такого материала является размерная стабильность деталей на всех технологических переделах изготовления, при этом, размерная стабильность зависит не только от химических, но и от физических свойств материала.

Физические свойства материала во многом определяются его реальной структурой. В процессе изготовления, происходит переход от одного вида микроструктуры к другому. Пористая структура, образующаяся при карбонизации углепластика, наследует основные особенности исходной структуры углепластика и способствует повышению равномерности распределения пироуглеродной матрицы в объеме материала.

В работе представлены результаты исследования основных закономерностей формирования структуры на основных этапах получения углерод-углеродного композита. Экспериментально определены упругие и прочностные характеристики на основных этапах получения углерод-углеродного композита.

ПРИЛОЖЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАРБУ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ СТАЦИОНАРНОГО ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА

Кудрявцев А.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Двумерное стационарное уравнение Шредингера как модель физического явления используется для описания различных волновых процессов в неоднородной среде, например нерелятивистской системы с фиксированной энергией в квантовой механике, поля акустического давления в неоднородной среде с фиксированной частотой в акустике. Двумерный оператор Шредингера при фиксированной энергии является предметом активного исследования для теории обратной задачи рассеяния.

Уравнение Шредингера в одномерном случае входит в класс уравнений для решения которых показал свою эффективность метод преобразования Дарбу [1]. Преобразование Дарбу привлекало в последние годы наибольшее внимание в применении к одномерному уравнению Шредингера в связи с возможностью получения новых решаемых моделей квантовой механики и в связи с многочисленными связями с популярной тематикой метода обратной задачи рассеяния и теорией солитонов. Однако приложение преобразования Дарбу дает мощный инструмент получения точных аналитических результатов и в других областях физики и математики.

В докладе рассматривается специальный вариант нелокального преобразования Дарбу [2], который позволяет находить точно решаемые двумерные стационарные операторы Шредингера с нетривиальным потенциалом. В качестве примера приводятся семейства зависящих от произвольных параметров гладких рациональных убывающих на бесконечности потенциалов. При конкретном выборе параметров получаются примеры гладких рациональных убывающих на бесконечности потенциалов, полученных ранее И.А. Таймановым и С.П. Царевым [3].

Литература:

1. Matveev V.B., Salle M.A. Darboux transformations and solitons. – Springer, 1991.
2. Kudryavtsev A.G. Exactly solvable two - dimensional stationary Schrodinger operators obtained by the nonlocal Darboux transformation // Physics Letters. A. – 2013. – Vol.377. – P.2477-2480.
3. Taimanov A., Tsarev S.P. Two-dimensional rational solitons and their blowup via the Moutard transformation // Theoretical and Mathematical Physics. – 2008. – Vol.157. – Iss.2. – P.1525-1541.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

Минат М.¹, Лурье С.А.²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

²*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

В настоящей работе предлагается модель волокнистого композиционного материала, армированного вискеризованными волокнами. Модель учитывает наличие вискеризованного межфазного слоя между волокном и матрицей. Определение эффективных свойств для такой трансверсально-изотропной гомогенной структуры осуществлено на основе точного аналитического решения самосогласованного метода Эшелби. В результате, получены аналитические отношения для эффективного модуля Юнга, эффективного продольного и поперечного модуля, эффективного модуля объемного сжатия и эффективного коэффициента Пуассона. Приводится сравнение результатов расчета эффективных свойств с результатами, полученными методами, предложенными другими авторами. Новизна этого исследования состоит в том, что при оценке эффективных свойств учитывается не только длина вискерсов и их объемное содержание в межфазном слое, но также диаметр нановолокон в структуре вискеризованного слоя, плотность расположений на поверхности волокон и типа материала вискерса. В целом, результаты расчетов показывают, что из-за наличия вискеризованного межфазного слоя, эффективные сдвиговые и поперечные свойства волокнистого композиционного материала могут быть существенно улучшены.

Работа поддерживается грантами РФФИ 12-01-00273 и 13-01-00872.

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАЦИИ УГЛЕРОДНО-СИЛИКАТНЫХ НАНОЧАСТИЦ, УСИЛИВАЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Никитина Е.А.¹, Яновский Ю.Г.¹, Никитин С.М.², Карнет Ю.Н.¹

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобелевича
МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва*

В работе изучены адгезионные взаимодействия углеродных и силикатных адсорбционных комплексов (наномоделей частиц активных наполнителей полимерных композитов). Компьютерные исследования проведены в рамках кластерного метода квантовой механики (NDDO, AM1) и подхода микроскопической координаты трения, реализованных в оригинальном пакете квантово-механических программ NDDO/sp-spd. В ходе квантово-механических расчетов определены энтальпии связывания силикатных и углеродных комплексов друг с другом и с молекулами различных дисперсионных жидких сред (спирты, ацетон и вода). Квантово-механические эксперименты моделировали процесс коллоидного размола микроразмерных углеродных и силикатных частиц. Рассматривали как энергетические, так и геометрические параметры, определяющие адгезионные взаимодействия указанных комплексов.

Показано, что адсорбционные комплексы (как силикатные, так и углеродные) агрегируются, удерживаясь рядом посредством межмолекулярных взаимодействий, как гидрофильного, так и гидрофобного характера. Взаимодействие активных групп на поверхности углерода и силиката с молекулами дисперсионных жидких сред может тормозить процесс агрегирования.

Установлено, что меньшие по размеру агрегаты силиката и углерода будут образовываться в присутствии дисперсионных сред с малыми размерами молекул (в нашем случае – спирты: этанол и метанол). При контакте подобных дисперсионных сред с комплексами силиката и углерода большая часть поверхности последних “закрыта”, и их активные центры “не работают” (т.е. возникает препятствие агрегации). В случае использования этанола и метанола контакты их молекул с силикатом или углеродом энергетически равноценны или превосходят энергии связей между ними (дополнительное препятствие агрегации). Во всех остальных рассмотренных в работе дисперсионных средах агрегация происходила более активно.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОДБОР НАПОЛНИТЕЛЕЙ ЭПОКСИДНЫХ КЛЕЕВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Никитина Е.А.¹, Яновский Ю.Г.¹, Никитин С.М.², Карнет Ю.Н.¹

¹ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцина
МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва

В настоящей работе в рамках квантово-механического подхода рассматривались различные наполнители, которые предлагается использовать для улучшения свойств эпоксидных клеев. Известно, что правильный подбор наполнителя позволяет изменять физико-химические свойства эпоксидных клеев и повышать механическую прочность и стабильность склеенных конструкций. Энергетические и прочностные характеристики межфазных слоев наполненных эпоксидных клеев исследовались в вычислительном эксперименте в рамках кластерного метода и подхода микроскопической координаты трения, реализованных в оригинальном пакете квантово-механических программ NDDO/sp-spd. При этом исследовались механизмы взаимодействия эпоксидной матрицы с поверхностью частиц различных наполнителей (алюминия, окиси алюминия, шунгита и двух его основных составляющих – аморфного углерода и силиката, графена, оксида графена, фуллерена и углеродных нанотрубок).

Полученные результаты показывают, что самым эффективным наполнителем, дающим самые высокие механические сдвиговые показатели, является оксид графена. Несколько уступают ему силикатный наполнитель и открытые углеродные нанотрубки. В этих случаях частицы наполнителя удерживаются фрагментами эпоксидных цепей как водородными, так и Ван-дер-Ваальсовыми, дисперсионными силами. Таким образом, оксид графена, силикаты и открытые углеродные нанотрубки перспективно использовать в качестве наполнителей эпоксидных клеев.

Был также проведен компьютерный подбор модификации компонентов эпоксидных клеев для улучшения их механических свойств. В ходе расчетов было получено, что, судя по энергии Есвяз и максимальной силе сдвигового трения Fсдв._МАХ, модифицированные силикаты намного лучше связываются с эпоксидной матрицей, чем немодифицированный силикат, причем, чем длиннее и разветвленнее цепь модификатора, тем связывание становится более энергетически выгодно и сдвиговое трение труднее. На основе проведенного компьютерного моделирования были даны рекомендации по использованию и модификации наполнителей эпоксидных клеев.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

Острик А.В.¹, Бакулин В.Н.²

¹ФГБУН Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Высокомодульные композитные материалы с углеродными волокнами широко используются для изготовления тонкостенных элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА), работающих в условиях воздействия нестационарных тепловых нагрузок. Расчет температурных полей и распределений тепловых уносов в таких конструкциях требуется для обоснования их работоспособности, в том числе, и прочности к полетным нагрузкам. В большинстве расчетных случаев, как сами конструкции, так и воздействующие тепловые потоки, оказываются осесимметричными, а соответствующая задача о тепломассопереносе в конструкциях – двумерной. Однако при облучении ЛА потоками излучений и частиц различной физической природы реализуется режим одностороннего воздействия и осесимметричность задачи уже не имеет места. В настоящей работе предлагается трехмерная модель тепломассопереноса в композитной ортотропной конической оболочке и численный метод ее реализации при действии эксплуатационных тепловых потоков и одностороннего воздействия потока излучения с объемным или поверхностным характером поглощения энергии.

В предположении, что направления осей ортотропии композита совпадают с направлением осей конической системы координат (z, s, θ) оболочки и температура твердого остатка равняется температуре газообразных продуктов термодеструкции, уравнение переноса тепла в твердой части преграды записывается в виде:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{a_z} \frac{\partial}{\partial z} \left(a_z \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{a_s} \frac{\partial}{\partial s} \left(a_s \lambda_s \frac{\partial T}{\partial s} \right) - \frac{1}{a_\theta^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \\ - G_g c_g \frac{\partial T}{\partial z} + Q_\Sigma(t, z, s, \theta), \quad a_z = z + s \operatorname{tg} \alpha, \quad a_s = s + z \operatorname{ctg} \alpha, \quad a_\theta = s \sin \alpha + z \cos \alpha,$$

где T – температура твердой фазы и газообразных продуктов; α – угол полураствора конуса; $\rho_s, c_s(T)$ – эффективные плотности и теплоемкости композита; $\lambda_{s,z,\theta}(T)$ – суммарные коэффициенты молекулярного и радиационного (внутри пор твердой фазы) переноса тепла в соответствующих направлениях; G_g, c_g – величина массового потока и теплоемкость газообразных продуктов; $Q_\Sigma(t, z, s, \theta)$ – суммарная мощность энерговыделения на единицу объема при поглощении потоков излучений и физико-химических превращениях (ФХП). Уравнение переноса тепла дополняется начальными и граничными условиями, сформулированными в достаточно общем виде и позволяющими учесть подводы и отводы тепла на поверхности конструкции, в том числе, и затраты на ФХП (например, на абляцию).

Сформулированная задача решается методом конечных разностей по неявной схеме с расщеплением по пространственным переменным. Получающиеся в результате системы нелинейных уравнений решаются итерационным методом Ньютона, а на каждом шаге итерации для решения систем линейных уравнений применяются одномерные прогоны. Для дополнительного контроля устойчивости и точности счета в процессе вычислений проверяется выполнение закона сохранения энергии применительно ко всей конструкции в целом.

Приводятся результаты расчетов температурных профилей и распределений толщин тепловых уносов при воздействии потоков излучений с объемным характером поглощения на ортотропную коническую оболочку из сферопластика.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - гранты № 11-08-01255, 13-08-01401, 13-08-12239.

НЕСТАНДАРТНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ИХ РЕШЕНИЯ

Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

Под нестандартными понимаются задачи механики деформируемого твердого тела, в которых количество заданных ограничений оказывается избыточным. Например, в плоской задаче при задании усилий на контуре в каждой точке стандартно задается вектор напряжений, определяемый двумя параметрами (в частности, нормальным и касательным напряжением). Если на контуре имеется точка, в которой заданы не два, а три или более независимых условий для напряжений, задача оказывается нестандартной. Нестандартные задачи характерны для тел, имеющих особенности в виде клиньев или ребер; для составных тел, например, слоистых; для конструкций, полученных путем пайки, сварки или склеивания и т.п. Во всех этих случаях имеются точки, в окрестности которых возникает концентрация напряжений. Интерес исследователей к изучению концентрации напряжений вблизи особых точек достаточно высок, при этом авторы ограничиваются подходами, опирающимися на стандартные методы, что не позволяет получить решение, согласующееся со всеми ограничениями на параметры состояния конструкции. В работе предлагается итерационный численно-аналитический метод решения нестандартных задач, преодолевающий этот недостаток. Основные этапы метода состоят в следующем:

1. Вблизи особой точки устанавливаются алгебраические равенства, которым должно подчиняться решение. Это граничные условия; условия непрерывности напряжений и кинематические условия на контактной поверхности; соотношения, связывающие параметры состояния непосредственно в особой точке.

2. Конечно-элементное решение о распределении напряжений в рассматриваемой конструкции принимается за нулевое приближение. Если оно не удовлетворяет алгебраическим равенствам (п.1), образуется вектор невязок.

3. Уточнение решения реализуется путем итерационного решения обратной задачи – поиска перемещений, обеспечивающих минимум вектору невязок.

Предлагаемая процедура оказывается сходящейся. Зависимость решения от конечно-элементной сетки уменьшается с ее сгущением.

Для исследования нестандартных задач с использованием технологий параллельных вычислений OpenMP разработан программный комплекс, реализованный на суперкомпьютере Тесла-ПГУ НОЦ ПиРВ.

Для отдельных значений геометрических параметров конструкций нестандартная задача может вырождаться в стандартную. В таких случаях проявляются уникальные свойства конструкций, например отсутствие концентрации напряжений вблизи особой точки.

Приводятся примеры решения плоских и пространственных нестандартных задач при механическом и температурном нагружении однородных и составных конструкций. Отмечаются характерные особенности распределения напряжений вблизи особых точек, проводится сравнение с решением, полученным стандартными методами.

О МАСШТАБНОЗАВИСИМЫХ МОДЕЛЯХ СТЕРЖНЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ГРАДИЕНТНЫХ ТЕОРИЙ УПРУГОСТИ

Попова Е.И.¹, Лурье С.А.²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

²*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

В настоящее время значительный интерес проявляется к учету масштабных факторов, то есть к учету параметров характеризующих структуру материала в прикладных задачах теории упругости. Масштабные эффекты нашли экспериментальное подтверждение при исследовании изгибной жесткости консольных стержней из алюминия, полипропилена и эпоксидной смолы (Kakunai et al. (1985), Lam et al. (2003) and McFarland & Colton (2005)). Подобные эффекты не могут быть учтены при использовании классической теории упругости, которая не принимает во внимание масштабные параметры. Наоборот, градиентные теории включают дополнительные параметры размерности длины и вполне подходят для моделирования масштабных эффектов.

В настоящее время опубликовано много научных исследований, посвященных анализу деформаций стержней с учетом масштабных эффектов. В работах Н.М.Ма, Х.-Л.Гао, J.N.Reddy (2008) использованы градиентные модели первого порядка типа Гао-Айфантиса. Такого типа задачи представляют интерес для микроэлектроники и при анализе биологических систем.

В представленной работе анализируются градиентные двухпараметрические модели Миндлина и следующие из них однопараметрические градиентные теории деформаций. Для всех рассматриваемых моделей предлагается вариационная постановка и формулируется принцип симметрии, который является условием корректности модели. В частности показано, что модель Гао-Айфантиса принципу корректности не удовлетворяет. С использованием однопараметрической корректной градиентной теории упругости строится модель стержней Тимошенко и как частный случай модель стержней Бернулли. Показано, что учет масштабных эффектов не дает поправки в изгибную жесткость для длинных стержней, как это было ошибочно указано в работах Ма и др.(2008) и Янга и др. (2002). Таким образом, использование корректных моделей подчиняющихся принципу симметрии, должны внести существенную поправку в опубликованные результаты других авторов. Масштабные эффекты локализуются в окрестностях торцов стержней. Цилиндрическая жесткость определяется классической формулой, если параметр структуры много меньше длины стержня. Приводятся частотные уравнения для размерозависимых стержней.

Работа поддерживается грантами РФФИ 12-01-00273 и 13-01-00872.

РЕГРЕССИОННО-ТЕНЗОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ МНОГОФАКТОРНЫХ КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМ

Русанов В.А.¹, Агафонов С.В.², Данеев А.В.³, Лямин С.В.³

¹*ФГБУН Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск*

²*Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, г. Иркутск*

³*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск*

Задачей работы было дать точное и удобное определение многомерной нелинейной векторной регрессии на языке тензорной алгебры, то есть дать такой язык апостериорного моделирования, на который можно перевести регрессионные математические утверждения, и записи на котором были бы компактны и удобны в обращении (кроме того, новый способ записи нередко порождает новые результаты). В данном контексте разработаны алгоритмы построения нелинейной математической модели «вход-выход», позволяющей определять геометрические координаты оптимального поведения МКС в распределенной среде технологических параметров, используемых для расчета [11] эффективного режима МКС. Предложенная тензорная регрессионная модель использует идентифицированные (на базе экспериментальных данных) многомерные билинейные уравнения, что позволяет адекватно описать поведение МКС в широком диапазоне вариаций технологических параметров ее функционирования (многофакторного поведения).

Изложенные в статье идеи можно развить в нескольких направлениях теоретико-прикладных изысканий [12-14] по совершенствованию предложенных выше алгоритмов расчета оптимальной технологии построения МКС, а также расширению рамок адекватности регрессионных уравнений МКС за счет дополнительного исследования факторов ее нелинейности:

- на разработку математической процедуры выбора весовых коэффициентов $\zeta_i, 1 \leq i \leq n$ линейной свертки (3), исходя из гарантированного удовлетворения спектральных условий (12), обеспечивающих эллиптический характер стационарной точки (10) целевого функционала F ;
- на расширение билинейной формы уравнений векторной регрессии (5) «тейлоровским разложением» вектор-функции w более высокого порядка (согласно утверждения 2);
- на статистическое описание и оптимизацию функционального поведения МКС [15];
- на включение в химико-термическую модель (13) дополнительных, к рассмотренным в п. 5, координат вектор-функции нелинейной регрессии, в частности, учет таких физико-механических параметров нанесения сульфохромированного слоя, как: поверхностная твердость, хрупкость, износостойкость, фрикционный коэффициент (коэффициент сухого трения);
- на развитие нано-метрических показателей синтеза сульфохромированного слоя и их качественный учет в структуре нелинейно-тензорной многомерной МКС-регрессии (1).

МЕТОД МНОГОМАСШТАБНОГО УСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Саваторова В.Л., Талонов А.В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Для описания свойств неоднородных материалов с периодическими структурами на разных масштабных уровнях предлагается использовать метод многомасштабного усреднения [1]. Предполагается, что в результате внешнего воздействия в среде возможны необратимые процессы, сопровождаемые изменениями структуры материала на отдельных масштабных уровнях. Разработанный метод был использован для описания эффективных теплофизических свойств материалов с периодическими структурами неоднородностей на различных масштабных уровнях. В качестве моделей периодических структур были рассмотрены системы слоев, цилиндрических и сферических включений, характерные размеры неоднородностей в которых существенно отличались друг от друга. Проведена оценка влияния структурных изменений на различных масштабных уровнях на изменение эффективных теплофизических характеристик сред, содержащих периодические системы неоднородностей на различных масштабных уровнях.

Литература:

1. Власов А.Н., Саваторова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно неоднородных средах. – М.: РУДН, 2009. – 258 с.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД. РАЗРАБОТКА, АНАЛИЗ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Суров В.С.^{1,2}, Березанский И.В.¹, Степаненко Е.Н.²

¹*Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск*

²*Челябинский государственный университет, г. Челябинск*

Представлен характеристический анализ моделей Baer'a – Nunziato, Saurel'a – Abgrall'a [1], Куропатенко В.Ф. [2], Chung'a, Chang'a, Lee [3] и Yeom'a G.-S., Chang'a [4], описывающие течение многоскоростной гетерогенной среды. Показано, что модель среды с газодинамическим ядром из [5], в отличие от моделей [1–4], качественно и количественно описывает поведение газожидкостных смесей во всем диапазоне изменения концентрации газа в смеси. Описан узловый метод характеристик, с использованием которого в рамках модели [5] рассчитан ряд задач о распаде произвольного разрыва в дисперсной среде.

Наряду с моделями многоскоростной гетерогенной среды обсуждаются односкоростные модели многокомпонентной среды [6], которые используются при моделировании волновых процессов во вспененных жидкостях и полимерах, в пузырьковых жидкостях, для локализации контактных поверхностей в многожидкостной гидродинамике, при разработке моделей кавитации и расчетах детонационных явлений. Включение в уравнения смеси сил вязкого трения и теплопроводности расширяет сферу приложения модели и дает возможность проводить расчеты течений, например, углеводородных смесей, биологических жидкостей и т.д. При рассмотрении распространения тепла вместо закона Фурье применялся закон Максвелла – Каттанео, учитывающий релаксацию теплового потока и обеспечивающий конечность скоростей перемещения тепловых волн, что в свою очередь связано с принадлежностью системы уравнений к гиперболическому типу. Вязкие релаксационные напряжения, как и тепловые эффекты, вводятся в уравнения модели многокомпонентной среды на уровне смеси в целом. Показано, что при использовании релаксационных законов для диссипативных процессов системы уравнений модели относятся к гиперболическому типу. С использованием узлового метода характеристик рассчитан ряд задач многожидкостной гидродинамики, а также исследованы волновые процессы в пенных и пузырьковых жидкостях. Показано, что в ряде случаев на волновую картину течения существенное влияние оказывают теплообменные явления.

Литература:

1. Zein A., Hantke M., and Warnecke G. Modeling phase transition for compressible two-phase flows applied to metastable liquids // J. Comput. Phys. – 2010. – Vol.229. – P.2964-2998.
2. Куропатенко В.Ф. Модель многокомпонентной среды // Докл. РАН. – 2005. – Т.403. – №6. – С.761-763.
3. Chung M.-S., Chang K.-S., Lee S.-J. Numerical solution of hyperbolic two-fluid two-phase flow model with non-reflecting boundary conditions // Int. J. of Engineering Science. – 2002. – Vol.40. – P.789-803.
4. Yeom G.-S., Chang K.-S. A modified HLLC-type Riemann solver for the compressible six-equation two-fluid model // Computers & Fluids. – 2013. – Vol.76. – P.86-104.
5. Суров В.С. Гиперболическая модель многоскоростной гетерогенной среды // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т.85, – №3. – С.495-502.

6. Суров В.С. Односкоростная модель гетерогенной среды с гиперболическим адиабатическим ядром // Журн. вычисл. математики и матем. физики. – 2008. – Т.48. – №6. – С.1111-1125.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СПИРАЛЬНОГО ТИПА

Тарасов С.С.¹, Данилин А.Н.²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

²*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

В настоящее время задачи о деформировании гибких проволочных конструкций с учетом их внутреннего строения привлекает большое внимание разработчиков нового оборудования в области энергоснабжения объектов военного и гражданского назначения, космической техники, энергетики, подводного оборудования, строительства.

Применение спиральной арматуры является одним из наиболее эффективных и дешёвых способов технического решения многих проблем, связанных с энергообеспечением и связью при помощи проводов, тросов и кабелей воздушных линий электропередачи (ВЛ). Применение спиральной арматуры обширно. Она используется в виде спиральных зажимов для натяжения, крепления проводов, тросов и кабелей, а также оперативного и надёжного ремонта проводов и тросов непосредственно на линии электропередачи. В последнем случае такой способ часто является *единственно возможным*. При неправильном подборе (расчёте) спирального зажима сердечник может потерять частично или полностью свои функции.

На основе энергетического осреднения разработана математическая модель деформирования конструкций, образованных из проволочных слоёв (повивов), навитых по цилиндрическим образующим относительно силового сердечника в центре конструкции (провода ВЛ, спиральные зажимы). Согласно предложенной модели, каждый повив представляется как эквивалентная по упругим свойствам анизотропная безмоментная цилиндрическая оболочка, а проволочная конструкция в целом рассматривается как система вложенных друг в друга цилиндрических оболочек, взаимодействующих между собой силами давления и трения по модели Кулона.

На основе предложенной модели построены определяющие соотношения, связывающие продольные и поперечные деформации с соответствующими силовыми факторами: получены явные формулы для вычисления матриц жесткости и податливости. Получены также явные формулы для вычисления изгибных и крутильных жесткостей с использованием гипотезы плоских сечений. Сформулированы начальные и краевые задачи для расчёта многоповивных натяжных и соединительных спиральных зажимов конечной длины. Предложены алгоритмы анализа несущей способности спиральных зажимов. Показано, что использование зажимов с переменным шагом позволяет управлять распределением усилий по длине зажима, уменьшить длину проволок зажима и снизить его вес, что особенно актуально для применения к оптоволоконным кабелям или проводам с композитным силовым сердечником.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-01-00471-а.

О ПОСТРОЕНИИ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО РЕШЕНИЯ С СОГЛАСОВАННОЙ КИНЕМАТИКОЙ В ЗАДАЧЕ ОБ ИЗГИБЕ ОРТОТРОПНОЙ ПОЛОСЫ СО СТАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ НА ПРОДОЛЬНЫХ КРАЯХ

Харченко К.Д.¹, Лурье С.А.²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва*

²*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

В работе строится алгоритм расчета, позволяющий дать уточненное описание НДС для ортотропной полосы в окрестности угловой точки, где имеет место смена граничных условий. Применяется метод, позволяющий построить замкнутое корректирующее решение задачи методом Власова-Конторовича для случая полосы со статическими граничными условиями на продольных кромках. Общий алгоритм построения состоит в следующем:

- строится основное полиномиальное решение, которое адекватно описывает НДС полосы вдали от её торцов и дает так называемое уточненное балочное решение (с учетом сдвига);

- далее предлагается общий алгоритм построения двух вспомогательных решений в тригонометрических рядах, одно из которых убирает невязку в уравнениях равновесия, а второе «снимает» краевые статические условия на продольных кромках. При этом обеспечивается однородность краевых условий на продольных кромках для замыкающего корректирующего решения, переводя неоднородность граничных условий на продольных кромках в граничные условия на торцах полосы.

Наконец, предлагается процедура построения корректирующего частного решения задачи, основанная на представлении компонент перемещений в форме согласованных тригонометрических рядов в отношении поперечной координаты. Это решение строится в замкнутой форме и обеспечивает выполнения произвольных краевых условий на торцах полосы. Таким образом, дается процедура построения замкнутого решения для широкого класса прикладных задач. Приводится построение решения тестовой задачи, доказывающего справедливость предложенного алгоритма.

Работа поддерживается грантами РФФИ 12-01-00273 и 13-01-00872.

Секция 6

Биомеханика

НАНОБАКТЕРИИ: ОТКРЫТИЕ, ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ТЕОРИИ ЭВОЛЮЦИИ, РОЛЬ В МЕДИЦИНЕ, ВЕТЕРИНАРИИ И ЭКОЛОГИИ

Зарайский Е.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Нанобактерии — биоминерал, круглые либо овальные органо-минеральные структуры размером от 30 до 200 нм, которые вызвали один из самых значительных споров в современной микробиологии. На сегодня большинство ученых считают, что нанобактерии не организмы, а некие конкреции. Они предлагают называть нанобактерии термином *nanons*. Термин *нанобактерии* впервые ввёл Ричард Морита в 1988, однако «отцом» нанобактерий считается Роберт Фолк. Начиная с 1992, он опубликовал серию работ по нанобактериям. Сначала нанобактерии были обнаружены геологами на минеральных поверхностях, такие структуры были позже найдены в организме человека и крови коровы. Название *Nanobacterium sanguineum* был предложен в 1998 году для найденных в почечных камнях органо-апатитовых шаровидных образований, похожих на найденные ранее в марсианских метеоритах и отложениях на камнях горячих источников финским исследователем Олави Каяндером и турецким исследователем Чифтчиоглу, работающими в университете Куопио в Финляндии. Их работа показала самокопирование и наличие ДНК в культуре этих образований. Нанобактерии оказались стойкими ко всем стандартным методам стерилизации — ультрафильтрации, термообработке и радиационному облучению. На них не действовали обычные противомикробные и противовирусные препараты, кроме некоторых антибиотиков тетрациклинового ряда. В 2004 году команда доктора Джона Лиски из клиники Мейо в Рочестере сообщила, что изолировала нанобактерии от больных артритом и почечными камнями. Их результаты были изданы в 2004 и 2006 годах соответственно. Некоторые исследователи считают, что рост нанобактерий связан не с тем, что они живые организмы, а с тем, что рост наночастиц происходит при наличии в окружающей среде легко доступных белков, которые способны скрепляться с кальцием и апатитом. А также было показано, что антитела, проданные в качестве диагностических инструментов для нанобактерий компанией Nanobac, фактически обнаруживает белки fetuin-A и альбумин. Многие считают, что нанобактерии не являются живыми организмами, и наблюдаемые явления связаны с кристаллизацией гидроксифосфатов кальция (апатита), при этом молекулы апатита являются центром кристаллизации, с чем связаны наблюдаемый «рост» и «размножение» кристаллов гидроксиапатита (также как и «пересев» на свежую среду). Наличие РНК в нанобактериях эти исследователи считают артефактом. Однако окончательных выводов, являются ли нанобактерии живыми организмами или нет сделать невозможно из-за размытости термина «жизнь» и недостаточности доказательств, как сторонников, так и противников признания нанобактерий формой жизни.

КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЖИ НА ОСНОВЕ ШУНГИТ СЕРЕБРЯНОГО НАНО-КОМПОЗИТА И НАНОРАЗМЕРНОГО ЗОЛОТА

Огудина Г.Н.¹, Зарайский Е.И.²

¹ООО «Нано-Лаб», г. Москва

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Одним из востребованных на сегодня методов восстановления механических свойств кожи является вшивание в кожу лица, декольте и рук золотых нитей, которые поддерживают ткани, утратившие упругость в силу уменьшения и ухудшения качества коллагеновых и эластиновых волокон от гравитационного обвисания. Однако этот метод имеет много побочных действий и недостаточно эффективен. Побочные действия метода связаны с его травматичностью, опасностью инфицирования и образования дефектов, вызванных выше названными причинами.

Нами был предложен комплекс косметических средств, содержащих несколько форм нанозолота, шунгит серебряный нано-композит и комплекс фито-экстрактов, улучшающих трофику кожи, а так же проникающих в лимфатическую систему с помощью специальной транспортной системы и нормализующих серотониновый обмен, который с возрастом нарушается из-за инволюции регулирующей его железы – эпифиза.

В комплекс входят 4 препарата: крем-маска, содержащая шунгит серебряный нано-композит и нанозолото в виде шариков диаметром 30 нанометров и растительные экстракты, гель, содержащий шунгит серебряный нано-композит и нанозолото в виде шариков диаметром 30 нанометров и растительные экстракты, листовое золото, толщиной 30-50 нанометров и лосьон, содержащий шунгит серебряный нано-композит и нанозолото в виде шариков диаметром 30 нанометров и растительные экстракты.

Частицы золота, проникают в кожу и становятся центрами фрактального синтеза новых коллагеновых и эластиновых волокон.

Нами были проведены исследования по изменению количества фибробластов и количество коллагена в коже, обработанной предложенным комплексом.

Было показано, что даже при однократном нанесении комплекса на кожу экспериментальных мышей количество фибробластов в коже достоверно увеличивалось.

Морфологические исследования кожи с окраской коллагеновых волокон и морфометрическим определением плотности коллагена, показали, что количество коллагеновых волокон в коже значительно увеличивается. Результат статистически достоверен.

Определение упругости кожи с помощью измерения ее электропроводности также показало увеличение после применения комплекса по сравнению с контролем.

Таким образом, было продемонстрировано, что разработанный комплекс улучшает производство фибрина и механические свойства кожи, несмотря на то, что по сравнению с вшиванием золотых нитей метод является не инвазивным.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ СЕРОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ РАКА ЛЕГКОГО

Осьмак Г.Ж.¹, Огудина Г.Н.², Полтавцев Ан.М¹, Зарайский Е.И.¹

¹ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва

²ООО «Нано-Лаб», г. Москва

Рак легкого – одно из наиболее распространённых заболеваний мира. Мелкоклеточная форма рака легкого относится к агрессивно текущим опухолям, характеризующимся коротким анамнезом, быстрым течением и тенденцией к ранней малигнизации.

Существует ряд методов для диагностики данного заболевания:

1. Анализ транскриптома малигнизированных клеток, иммуногистохимическое определение активности проапоптотических факторов.
2. Определение концентрации онкомаркера NSE (нейронспецифическая енолаза) Специфичность не превышает 80%, маркер может выявляться при доброкачественных заболеваниях.
3. Серодиагностики с помощью панели биомаркеров NCAM120, NCAM140, СК(4-10), СК(13-20).

Но данные методы не пригодны для массовой серологической скрининговой диагностики населения.

Для повышения диагностической ценности серологической диагностики мелкоклеточного рака легкого, а также для повышения его ценности для скрининга населения с целью ранней диагностики мелкоклеточного рака легкого нами предлагается способ серодиагностики мелкоклеточного рака легкого, включающий в себя обнаружение специфической фукозилтрансферазы в сыворотке пациентов, отличающийся тем, что для обнаружения специфической фукозилтрансферазы ганглиозид FucGM1 иммобилизуют на внутренней поверхности полиэтиленовых 96 луночных планшетов в искусственной мембране, состоящей из лецитина и холестерина в соотношении ганглиозид, лецитин, холестерин – 30:50:30; затем неспецифические сайты связывания в лунках блокируют белком из группы альбумин, овальбумин в концентрации 1%, затем раствор белка удаляют и заполняют лунки исследуемой сывороткой крови к которой добавляют $MnCl_2$ и GDP-фукозу^{C14}, затем смесь инкубируют, лунки отмывают, плашку разрезают на отдельные лунки, которые помещают в кварцевые вials для подсчета радиоактивного сигнала, после чего сигнал учитывают на сцинтиляционном счетчике бета частиц, после чего сравнивают сигнал от исследуемых сывороток с сигналом от донорских сывороток, причем сигнал считают положительным, если он превышает сигнал донорских сывороток не менее чем на 50%

Способ позволяет выявлять наличия патологической специфической фукозилтрансферазы в сыворотках пациентов, больных мелкоклеточным раком легкого, т.к. в норме FucGM1 у человека не вырабатывается и специфической фукозилтрансферазы, превращающей ганглиозид GM1 в ганглиозид FucGM1 у доноров не обнаруживается.

ЭКСПРЕСС МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕЙРОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ И НАНОКОМПОЗИТОВ

Осьмак Г.Ж., Полтавцев Ал.М., Полтавцев Ан.М., Зарайский Е.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

С начала XXI века интерес человечества к наночастицам многократно возрос, а к концу 2010 года вещества на основе наночастиц и нанокomпозитов начали активно внедряться в медицинскую практику, в том числе и для решения проблем, касающихся эстетической медицины. Таким образом, препараты на основе наночастиц и нанокomпозитов на данный момент активно применяются на человеке, и их количество прогрессивно растет. В этой связи, появляется необходимость в разработке методов экспресс диагностики биобезопасности, в частности нейротоксичности, наночастиц и нанокomпозитов.

Для решения подобных задач нами предложен комплекс тестов для постановки биологических проб, для оценки нейротоксичности препаратов на основе наночастиц и нанокomпозитов.

Для оценки деятельности лимбической системы, отвечающей за эмоционально-поведенческую активность, использовался модифицированный вариант теста «открытое поле». Установка представляет собой квадратную площадку с 12-ю камерами общей площадью 4800см², камеры ограничены непрозрачными бортами высотой 10 см, с постоянным сумеречным освещением, длина стороны каждой камеры 20 см. На фронтальных и боковых стенках установлены источники плоскополяризованного монохроматического света с фотокатодами на противоположенной стенке соответственно. Продолжительность опыта для группы мышей составляет 20 минут. Пересечение луча лазеров автоматически фиксировалось на электронном счетчике, регистрирующем ряд элементарных двигательных актов, совокупность которых характеризует целостное поведение в «открытом поле».

Для оценки деятельности пирамидной, экстрапирамидной системы и мозжечка, использовался модифицированный вариант теста «beam walking (сужающаяся дорожка)». Модификация классической модели заключается в том, что в тесте используется аппаратный комплекс из десяти дорожек с видео фиксацией, что позволяет сократить время затрачиваемое на проведение эксперимента в 10 раз, соответственно.

Для оценки деятельности нейроэндокринной регуляторной сети и опорно-двигательного аппарата в стрессовой ситуации – использовался тест «вынужденного плавания», который представляет собой модификацию теста «поведение отчаяния» Порлсонта. Кратко, крыса с фиксированным грузом (7,5% от массы крысы) погружается в воду и плавает до утомления (погружение крысы под воду). Время плавания над водой фиксируется.

Выше описанными методами была исследована нейротоксичность шунгит серебряного нанокomпозита (ШСН). Было сформировано три группы: 1 – крысы которым перорально вводили ШСН (5мг/кг); 2 – контрольная группа – перорально вводили dH₂O; 3 – позитивный контроль – перорально вводили «Регулат» - тонизирующее средство, индуктор АТФ. Статистически значимых различий между контрольной и опытной группой выявлено не было (уровень значимости: $p < 0,05$).

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОФЛОРЫ КИШЕЧНИКА В РЕЗУЛЬТАТЕ СТАРЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЛЕКАРСТВ

Паршиков И.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

С возрастом человека происходят изменения видового состава бактерий в кишечнике. Среднее общее количество анаэробов в фекальных материалах пожилых людей остается относительно стабильным, однако, часто наблюдаются изменения в процентном соотношении бактерий различных родов.

Многочисленные исследования показали, что с возрастом происходит снижение числа жизнеспособных бактерий из рода *Bacteroides*. Это явление неслучайно и объяснимо приемом большого количества антибиотиков в течение жизни. Изменения в составе важных субпопуляций бактерий на уровне видов могут быть оценены, как следствие изменения метаболической активности у пожилых людей.

Увеличение протеолитических бактерий, таких как фузобактерии, пропионибактерии и клостридии, в кишечнике пожилых людей, может указывать на тенденцию к путрефакции толстой кишки, главным образом у пациентов, подвергшихся антибактериальной терапии. Род *Clostridium* включает гетерогенную группу микроорганизмов с весьма разнообразными типами питания и требованиями к местам обитания.

Ранее было замечено снижение процента клостридиев в кишечнике у молодых и пожилых пациентов в результате использования ципрофлоксацина. Однако многие исследования показали, что у пожилых пациентов происходит увеличение клостридий в сочетании со значительным повышением видового разнообразия, особенно после антибиотикотерапии.

В последнее время в лечебную практику входит применение нового поколения лекарств – нанолекарств. Нанолекарства могут вводиться внутривенно и перорально. Пероральное применение имеет свои преимущества по сравнению с внутривенным введением. Однако, результат перорального применения – отрицательное влияние на микрофлору кишечника и, особенно, у пожилых людей.

На сегодня уже известно несколько видов нанолекарств:

- нановакцины – вакцины, не содержащие природных вирусов и бактерий, но имитирующие их строение и структуру. Наночастица имеет тот же размер, что и вирус и иммунная система воспринимает ее как вирус. Готовится к выпуску вакцины от курения, папилломы человека, диабета.

- металлические наночастицы могут уничтожать раковые клетки, если ими насытить опухоль, а затем переменным магнитным полем нагреть опухоль.

Нанолекарства способны продлить жизнь, так как способны бороться с агрессивными свободными радикалами.

Американские ученые разработали микро роботов для доставки цитостатиков.

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТИ НАНОСОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЕЙ ТЕТРАЗОЛИЯ

Полтавцев Ал.М.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Ранее нами были предложены модели оценки острой и хронической токсичности наночастиц, нанокомпозитов и нанопокровов 3D-объектов с помощью оценки их воздействия на первичные культуры монослойноприкрепленных клеток. Эти методы позволяют быстро и не дорого диагностировать токсичность нанообъектов сразу после их синтеза. Для оценки цитотоксичности в этих тестах применялась люминесцентная окраска и подсчет клеток с помощью микроскопов. Недостатком этих методов является трудоемкость микроскопического подсчета клеток и проблемы при попытках автоматического подсчета клеток по полученным изображениям.

Известен МТТ метод оценки пролиферации и жизнеспособности клеточных культур. Нами была предпринята попытка использования МТТ-теста для оценки острой токсичности на спиртовой модели. В токсикологии для оценки параметра LD-50 в качестве стандарта для нормирования метода традиционно используют спиртовую модель на основе этилового спирта и модель на основе бихромата калия.

Мы оценивали цитотоксичность шунгит-серебряного нанокомпозита, а в качестве нормирующей модели использовали спиртовую модель. В качестве модельной культуры использовали первичную культуру клеток фетальных фибробластов кожи.

Было показано, что инкубация культуры клеток с этанолом в концентрации 100% и 20% на протяжении 1-го часа - 100% приводило к гибели клеток, тогда как жизнеспособность при концентрациях 4%, 0,8% и 0% этанола статистически достоверно не различалось. Результат был достоверен по U-критерию Вилкоксона-Манна-Уитни при $p < 0,05$.

Инкубация этой же культуры с концентрацией шунгит-серебряного нанокомпозита, составляющей 500 мкг/мл (в 10 раз превышающей используемую в промышленности) не выявила достоверного понижения жизнеспособности, что согласуется с данными, полученными методами флуоресцентной микроскопии.

При инкубации культуры клеток с этанолом в концентрации 100%, 20%, 4%, 0,8% на протяжении 24 часов - 100% приводило к гибели клеток, тогда как жизнеспособность при концентрации 0% этанола составляла 97%. Результат был достоверен по U-критерию Вилкоксона-Манна-Уитни при $p < 0,05$.

Инкубация культуры с концентрацией шунгит-серебряного нанокомпозита, составляющей 500 мкг/мл в течение 24 часов не выявила достоверного понижения жизнеспособности, что согласуется с данными, полученными методами флуоресцентной микроскопии.

Таким образом, тест на выявление солей формазана при использовании МТТ-теста может быть использован, как самостоятельный или дополнительный тест для оценки острой токсичности наночастиц и нанокомпозитов.

ОДНОРАЗОВЫЙ БОКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВ НА БИОЦИДНОЕ ДЕЙСТВИЕ И БИОБЕЗОПАСНОСТЬ НАНОЧАСТИЦ И НАНОКОМПОЗИТОВ

Полтавцев Ал.М, Осьмак Г.Ж., Полтавцев Ан.М, Зарайский Е.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

Для оценки биоцидного действия наночастиц и нанокomпозитов необходимо производить посев культур микроорганизмов, в том числе опасных и особо опасных на специальные среды в стерильных условиях, инкубировать их с исследуемыми материалами, учитывать результаты и утилизировать отходы.

Для оценки биобезопасности наночастиц и нанокomпозитов необходимо инкубировать их с культурами клеток млекопитающих в стерильных условиях, учитывать результаты и утилизировать отходы. Для проведения таких работ используют специальную аппаратуру, в частности культуральные боксы. Это оборудование громоздко, дорогостоящее, требует стационарных источников электропитания. Для решения проблем оценки биоцидности и биобезопасности наночастиц и нанокomпозитов в условиях отсутствия культуральных боксов, а также в полевых условиях, нами предложен одноразовый культуральный бокс. Бокс состоит из разборной рамы многократного использования, позволяющей в течение пяти минут собирать каркас для бокса размером 1500x1500x1000 и одноразовой стерильной пленочной камеры, в развернутом размере составляющей 1500x1500x1000 или общим объемом 2,25м³. Камера имеет отстежной клапан с фронтальной стороны, который в зависимости от модификации может позволять разной степени изоляцию обрабатываемых объектов от оператора (до 100%). В сложенном виде бокс укладывается в пакет размером 500x200, а каркас в тубус диаметром 200 и высотой 1500. Данный комплект весит не более 2кг. и приспособлен для ручной переноски. Полный монтаж бокса занимает 10 минут. Стоимость комплекта 100-200\$. Стоимость одноразовой камеры – не более половины стоимости комплекта. В тоже время стоимость культурального бокса 5000-15000\$, а для решения мобильных задач он не приспособлен.

Нами собрана действующая модель одноразового бокса и проведена оценка стерильности внутри него. Для этого после разворачивания бокса в нем были установлены 10 открытых чашек Петри с культуральной средой. Контрольные чашки были установлены снаружи бокса. После двухчасовой инкубации чашки были закрыты стерильными крышками и помещены в термостат с температурой 37°C. После 12 часовой инкубации в чашках, находившихся в боксе, не обнаружено признаков бактериального или грибного зароста. Во всех десяти чашках контроля было отмечено закисление среды (красный индикатор сменил цвет на рыжий и соломенный), было отмечено помутнение среды (бактериальный пророст), появление колоний и гифов грибов. Таким образом, была доказана высокая защищенность предложенного бокса от внешней флоры и пригодность для решения задач оценки биобезопасности наночастиц и нанокomпозитов.