

XV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
**СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЯ**  
И  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**  
ТЕЗИСЫ



XV INTERNATIONAL CONFERENCE  
**SUPERCOMPUTING**  
and  
**MATHEMATICAL MODELING**  
ABSTRACTS

Sarov  
October 13-17

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«РФЯЦ-ВНИИЭФ»**

**XV Международная конференция**  
**СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЯ**  
**И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**  
**Т Е З И С Ы**

**Саров**  
**13–17 октября**  
**2014**



## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Абалакин И. В., Жданова Н. С., Козубская Т. К.</i> Применение метода штрафных функций для моделирования течений вокруг препятствий на неструктурированных сетках с использованием суперкомпьютеров .....	11
<i>Абалакин И. В., Бахвалов П. А., Дубень А. П., Козубская Т. К.</i> Квазиодномерные конечно-разностные EBR схемы для моделирования реальных задач аэродинамики на неструктурированных сетках .....	12
<i>Абрамов С. М., Климов Ю. А., Шворин А. Б.</i> Коммуникационная сеть со скоростью передачи данных 56 Гбит/с .....	14
<i>Абузьяров М. Х., Глазова Е. Г., Зефиоров С. В., Кочетков А. В., Крылов С. В.</i> 3D комплекс для решения нестационарных задач взаимодействия сплошных сред в Эйлеровых переменных .....	15
<i>Авдеев П. А., Александрова О. Л., Артемова Е. О., Афанасьев В. А., Барабанов Р. А., Борляев В. В., Дьянов Д. Ю., Дяченко И. А., Казанцев А. В., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Медведкина М. В., Морозов С. В., Наумов А. О., Пристаи М. М., Разваров Д. И., Резвова Т. В., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тагирова И. Ю., Филимонкин Е. А., Циберев К. В., Челаков А. А., Шувалова Е. В.</i> Обзор возможностей моделирования задач прочности с использованием пакета программ ЛОГОС .....	16
<i>Авербух В. Л., Манаков Д. В.</i> Визуализация трассы выполнения параллельных программ .....	17
<i>Аксенов А. А., Бартенев Г. Ю., Дядькин А. А., Жлуктов С. В., Похилко В. И.</i> Метод расчета многофазных течений при любых числах Маха .....	19
<i>Алейников А. Ю.</i> Гетерогенная декомпозиция неструктурированной многогранной расчетной сетки .....	20
<i>Амосков В. М., Арсланова Д. Н., Базаров А. М., Белов А. В., Беляков В. А., Васильев В. Н., Гапионок Е. И., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Ларионов М. С., Максименкова Н. А., Сычевский С. Е., Фирсов А. А., Шатиль Н. А.</i> Особенности численного моделирования систем электродинамического подвеса магнитолевитационного транспорта с использованием многопроцессорных ЭВМ .....	20
<i>Амосков В. М., Базаров А. М., Беляков В. А., Гапионок Е. И., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Сычевский С. Е.</i> Особенности численного моделирования электромагнитных процессов в проводящих структурах реактора ИТЭР с использованием многопроцессорных ЭВМ .....	21
<i>Андреевских Л. А., Епишков И. М., Корепова Н. В., Линник Д. М., Муругова О. О., Титова В. Б., Чернышев Ю. Д.</i> Численный метод решения уравнений газовой динамики на адаптивно-встраиваемой лагранжевой сетке в трехмерном пространстве в методике Д .....	23
<i>Бадерников А. В., Печеник Е. В., Лисицин А. Н.</i> Результаты исследования двухфазного течения жидкость/газ в полости с вращающимся валом .....	24
<i>Бадьин Д. А., Богданов П. Б., Журавлев В. В.</i> Трехмерное моделирование транзитной динамики возмущений в астрофизических дисковых течениях .....	25
<i>Баженов В. Г., Дюкина Н. С., Кибец А. И.</i> Анализ сейсмостойкости заглубленных сооружений в программном комплексе «Динамика-3» ..	26
<i>Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Каныгин И. И., Филимонкин Е. А., Циберев К. В.</i> Пакет программ ЛОГОС. Метод решения задач статической прочности тонкостенных и стержневых конструкций на основе solid-shell технологии .....	27

<i>Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Филimonкин Е. А., Циберев К. В.</i>	
Пакет программ ЛОГОС. Учет эффектов ползучести при решении задач статической прочности ...	28
<i>Барахвостов А. В., Городничев Р. В., Лисин А. А., Марфина Е. А., Филиппов П. Н.</i>	
Распределенно-параллельная система визуализации трехмерных результатов численного моделирования «VIZIReflex» .....	29
<i>Бартенев Ю. Г., Ерзунов В. А., Карпов А. П., Петров Д. А., Пищулин И. А., Стаканов А. Н., Щаникова Е. Б., Капорин И. Е., Милюкова О. Ю., Харченко С. А., Коньшин И. Н., Мееров И. Б., Сысоев А. В.</i>	
Комплекс библиотек параллельных решателей слау LParSol версии 3 .....	30
<i>Басалов В. Г.</i>	
Перспективная гибридная топология KNS для коммуникационной сети на основе аппаратного модуля СМПО-10GA-1 .....	32
<i>Бахтерев М. О.</i>	
Система событийно-управляемой трансляции LiME .....	33
<i>Беломестных О. В., Гагарин С. В., Приб Е. А., Ушкова А. А.</i>	
Унифицированная система «GeomGrid2» для обеспечения препроцессинга двумерных задач математического моделирования .....	35
<i>Бендерский Л. А., Любимов Д. А.</i>	
Применение эффективной LES-технологии для расчета параметров турбулентности и шума в струях турбореактивных двигателей .....	36
<i>Берсенов А. Ю., Ваганова Н. А., Васёв П. А., Гусарова В. В., Игумнов А. С., Филимонов М. Ю.</i>	
Вычисления по запросу на примере моделирования эксплуатации добывающих скважин в вечной мерзлоте .....	37
<i>Бондаренко Ю. А., Софронов В. Н.</i>	
Прямое одномерное газодинамическое моделирование распространения волн в периодических двухслойных средах и волновые уравнения с дисперсией .....	38
<i>Бондаренко Ю. А., Софронов В. Н.</i>	
Согласование сетки и точность счета взаимодействия звука с границами между веществами в разностных схемах одномерной лагранжевой газодинамики .....	40
<i>Бутнев О. И., Горев И. В., Бардина М. Н., Горев В. В., Колесников С. С., Куваев А. А., Кузьмина О. И., Машенькин П. А., Пронин В. А., Семенов М. Е., Сидоров М. Л.</i>	
Верификация программного пакета «НИМФА» на геофильтрационных моделях объектов госкорпорации «Росатом» .....	41
<i>Бутнев О. И., Горев И. В., Дерюгин Ю. Н., Машенькин П. А., Колесников С. С., Сидоров М. Л., Пронин В. А., Кузнецов В. Ю., Яруллин А. Д.</i>	
Программная платформа НИМФА-2 на структуре данных ЛОГОС для моделирования многофазной фильтрации в геологических средах .....	42
<i>Быков А. Н., Гордеев Д. Г., Жильникова Н. Н., Куделькин В. Г., Сизов Е. А., Федоров А. А.</i>	
Адаптация методики РАМЗЕС-КП для решения задач газовой динамики и теплопроводности на гибридных параллельных ЭВМ .....	43
<i>Бычин И. В., Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Гореликов А. В., Ряховский А. В.</i>	
Моделирование задач гидродинамики и теплообмена на гибридных вычислительных системах с графическими ускорителями .....	45
<i>Васёв П. А., Бахтерев М. О.</i>	
Декларативно-императивный метод конструирования сцен научной визуализации .....	46
<i>Гагарин С. В., Беломестных О. В., Кузьмина С. И., Приб Е. А., Ушкова А. А.</i>	
Выполнение интерполяции данных двумерных расчетов в программном комплексе «БАЗИС» .....	47
<i>Галкин В. А.</i>	
Математическое моделирование в кинетических системах .....	48

<i>Голубев В. И., Петров И. Б., Хохлов Н. И.</i> Численное решение задач динамики гетерогенных сред на высокопроизводительных вычислительных системах .....	51
<i>Голяков В. И., Наумкин А. В.</i> 3D-моделирование поведения защитных железобетонных конструкций АЭС при падении самолета .....	52
<i>Горобец А. В., Суков С. А., Триас Ф. Х., Богданов П. Б.</i> Конечно-объемные алгоритмы для моделирования турбулентных течений на гибридных суперкомпьютерах .....	54
<i>Городничев А. В., Залесский В. В., Иоилев А. Г., Капинос С. А., Кочнев Ю. В., Краюхин А. А., Лапичев Н. В., Мотлохов В. Н., Пронина О. Н., Рыжов И. В., Сальников А. В., Соколов С. С., Чайка Т. И., Янилкин Ю. В.</i> Высокоскоростное проникание стержневого ударника в гранит: эксперимент и численное моделирование по методикам ЭГАК и ТИМ .....	55
<i>Городничев А. В., Иоилев А. Г., Краюхин А. А., Мотлохов В. Н., Пронина О. Н., Соколов С. С., Чайка Т. И., Янилкин Ю. В.</i> Численное моделирование движения песчаного грунта при взрыве пластины ВВ по методикам ЭГАК и ТИМ .....	57
<i>Дерюгин Ю. Н., Полищук С. Н., Тихомиров Б. П.</i> Расчет лучистой теплопроводности в методике МРС с использованием неточных методов Ньютона .....	58
<i>Дерюгин Ю. Н., Жучков Р. Н., Зеленский Д. К., Саразов А. В.</i> Технология решения задач на сетках типа «Химера» в пакете программ ЛОГОС .....	59
<i>Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В., Стародубов С. В., Циберев К. В., Челаков А. А.</i> Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц .....	60
<i>Егужова М. Ю., Жмайло В. А., Софронов В. Н., Чернышова О. Н., Янилкин Ю. В., Глазырин С. И.</i> Реализация, исследование и тестирование трехмерных вычислительных методов решения МГД уравнений в эйлеровых переменных для сжимаемых многокомпонентных сред .....	61
<i>Зайцев Ф. С., Аникеев Ф. А., Богданов П. Б.</i> Высокоскоростные алгоритмы решения многомерных кинетических уравнений методом сглаженных частиц .....	62
<i>Зайцев Ф. С., Сучков Е. П., Богданов П. Б.</i> Параллельные алгоритмы управления границей тороидальной плазмы методом эпсилон-сетей .....	63
<i>Зубанов Д. В., Быков А. Н., Воронин Б. Л., Ерофеев А. М.</i> Использование сочетания подвижных и неподвижных сеток при решении двумерных задач газовой динамики и теплопроводности в методике РАМЗЕС-КП .....	64
<i>Зубин М. А., Максимов Ф. А., Остапенко Н. А.</i> О давлении в ударном слое около V-образных крыльев при существовании невязких вихревых структур .....	65
<i>Игумнов Л. А., Ипатов А. А., Лебедева Е. А.</i> Применение параллельных вычислений при решении краевых задач трехмерной динамической теории вязкоупругости методом граничных элементов .....	67
<i>Игумнов Л. А., Марков И. П., Белов А. А., Воробцов И. В.</i> Решение краевых задач трехмерной динамической теории электроупругости методом граничных элементов с использованием параллельных вычислений .....	69

<i>Игумнов Л. А., Петров А. Н., Аменицкий А. В.</i> Применение параллельных вычислений для решения задач трехмерной динамической теории пороупругости методом граничных элементов .....	70
<i>Игумнов Л. А., Ратаушко Я. Ю., Литвинчук С. Ю.</i> Использование параллельных вычислений при решении трехмерных задач динамической пороупругости методами граничных элементов и Рунге-Кутты .....	71
<i>Ильин В. П.</i> Базовая система моделирования: вопросы автоматизации построения алгоритмов и их отображения на архитектуру ЭВМ .....	72
<i>Ионов Г. В.</i> Векторизация алгоритмов распознавания кристаллических структур .....	73
<i>Кабанихин С. И., Шишленин М. А.</i> Методы продолжения физических полей с части границы .....	73
<i>Кадатский М. А., Хищенко К. В.</i> Расчет ударных адиабат диоксида кремния по модели Хартри–Фока–Слэтера .....	74
<i>Камм Дж. Р., Деблинг С. У., Израэл Д. М., Синглтон Р.</i> Свободное программное обеспечение EхastPack для получения точных решений с целью проверки достоверности кодов .....	74
<i>Капица Д. В., Образцов Е. П., Козлов В. Б., Болнов В. А., Зотов И. С.</i> Развитие программно-технического комплекса «Виртуальный энергоблок» АЭС (ПТК «ВЭБ») и расширение области применения на энергоблоки с реакторной установкой БН-1200 .....	75
<i>Капорин И. Е., Милюкова О. Ю., Бартенев Ю. Г.</i> Массивно-параллельные предобусловленные итерационные методы решения больших несимметричных разреженных СЛАУ .....	76
<i>Карчевский Е. М., Плещинский Н. Б., Спиридонов А. О.</i> Применение компактной суперЭВМ АПК 1М для решения вычислительных задач волноводной электродинамики .....	78
<i>Климов А. В., Козлова Т. Г.</i> Опыт программирования параллельной асинхронной молекулярной динамики для потокового супервычислителя ППВС «БУРАН» .....	79
<i>Козелков А. С., Курулин В. В., Пучкова О. Л.</i> Зонный RANS-LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений .....	80
<i>Козелков А. С., Тятюшкина Е. С., Курулин В. В.</i> Применение RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля .....	81
<i>Козелков А. С., Шагалиев Р. М., Дерюгин Ю. Н., Курулин В. В., Ялозо А. В., Лашкин С. В.</i> Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях .....	82
<i>Конюхов В. М., Конюхов И. В., Краснов С. В.</i> Задачи оптимизации эксплуатационных режимов работы системы «нефтяной пласт – добывающая скважина, оборудованная центробежным электронасосом» .....	83
<i>Конюхов В. М., Конюхов И. В., Чекалин А. Н.</i> Численное моделирование эксплуатационных термогидродинамических процессов в нефтяном пласте и системе вскрывающих его скважин, оборудованных электроцентробежными насосами .....	84
<i>Костарев А. А., Королев С. Н.</i> Численное моделирование газодинамических параметров под головными обтекателями ракет космического назначения на активном участке полета .....	85

<i>Кравчук М. О., Кудимов Н. Ф., Сафронов А. В.</i> Результаты расчетно-экспериментальных исследований пространственного взаимодействия сверхзвуковых многоблочных струй продуктов сгорания с преградами .....	87
<i>Кузнецов С. А., Зиганишина Г. Г., Лотфуллина Э. Р., Старожилова О. В., Хусаинова А. Н.</i> Влияние граничных условий на распределение контактных напряжений при взаимодействии пластин с жесткими телами .....	88
<i>Лашкин С. В., Козелков А. С., Герасимов В. Ю., Зеленский Д. К., Полищук С. Н., Ялозо А. В.</i> Использование алгебраического и геометрического подходов к декомпозиции расчетной области при моделировании газодисперсных сред .....	89
<i>Лашкин С. В., Козелков А. С., Ялозо А. В., Тарасова Н. В.</i> Исследование эффективности разделенного и совмещенного подходов численного решения уравнений Навье–Стокса в задачах гидродинамики .....	90
<i>Любимов Д. А., Потехина И. В.</i> Численное моделирование отрывных турбулентных течений в турбореактивных двигателях RANS/ILES методом высокого разрешения .....	91
<i>Майер А. Е., Хищенко К. В.</i> Высокоэнтропийный слой вещества на контактной границе соударяющихся тел .....	92
<i>Майлз А. Р.</i> Комплексное моделирование систем ВМГ – нагрузка и новая тестовая задача для исследования целостности лайнера .....	93
<i>Максимов Ф. А.</i> Исследования течений с вихрями Тейлора .....	93
<i>Мержиевский Л. А., Воронин М. С.</i> Модель деформирования полимеров, модифицированных ионизирующим излучением .....	95
<i>Микушин В. Я., Матвеев И. В.</i> 3DTransVidia как универсальная платформа для гибридного моделирования и построения препроцессоров .....	96
<i>Миронов А. В.</i> Использование стандартов OpenMP и MPI при распараллеливании решения уравнения переноса методом Монте–Карло .....	97
<i>Михайлов И. О., Авербух В. Л.</i> Современные методы визуализации больших и сверхбольших объемных данных .....	97
<i>Михайлюков К. Л., Храмов И. В., Скобеев А. В., Потапов С. В., Фролова Н. В., Романова М. Д.</i> Программа моделирования протонных изображений ПИ: краткое описание и примеры применения .....	98
<i>Михеев И. В., Маралев А. Ю., Губкина Е. А.</i> Распараллеливание процесса оптимизации с использованием IOSO PM и кластерных вычислительных ресурсов .....	99
<i>Надугев А. Г., Черевань А. Д., Кожяев Д. А.</i> Организация распределенного многопользовательского режима подготовки исходных данных для решения задач компьютерного моделирования транспортных систем методами базы данных PostgreSQL .....	100
<i>Низамутдинов В. Р., Осипов С. Л., Прокопцов И. С., Рогожкин С. А.</i> Исследование применимости коммерческих CFD-кодов для моделирования процессов теплопереноса в жидкометаллическом теплоносителе .....	102
<i>Олесницкая К. К., Антипин И. А., Петрова М. А.</i> Библиотека EFR как средство эффективного доступа к файловым данным на гибридных вычислительных системах и суперкомпьютерах .....	103
<i>Олесницкая К. К., Антипин И. А., Петрова М. А.</i> EFR-Tools как средство модификации, верификации и валидации расчетных данных единого файлового разреза .....	104

<i>Осинин И. П., Князьков В. С., Князькова Т. В.</i>	
Модулярно-систолическая структура для параллельно-конвейерных вычислений .....	105
<i>Останко Д. А., Чагина В. А., Дугаров Э. А.</i>	
Численное моделирование средствами программного комплекса ЛОГОС динамики движения гильз в тракте гильзоотвода и при отделении от носителя .....	105
<i>Отряхина К. В., Ковалев С. А., Пятунин К. Р., Михеев И. В., Виноградов К. А., Диденко Р. А.</i>	
Разработка методики многопараметрической оптимизации лопаточной машины на основе параллельных вычислений .....	107
<i>Понятский В. М., Кислинский И. В.</i>	
Исследование полета вращающегося летательного аппарата (ЛА) .....	108
<i>Попова Т. В., Майер А. Е., Хищенко К. В.</i>	
Численное моделирование динамического нагружения полиметилметакрилата .....	110
<i>Раткевич И. С., Бартенев Ю. Г., Касаткин С. С.</i>	
Языковой сервис FRIS для эффективной разработки Fortran-приложений .....	110
<i>Рейновски Р. Е.</i>	
Задачи моделирования взаимодействия электромагнитных полей с веществом .....	112
<i>Речкин В. Н., Баранов А. В.</i>	
Верификация ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ на задачах определения собственных частот и форм колебаний цилиндрических оболочек .....	113
<i>Речкин В. Н., Чембаров А. И., Косарим С. С., Александрова О. Л.</i>	
Возможности учета напряженно-деформированного состояния конструкций при разрешении задач модального анализа в ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ .....	114
<i>Родионов А. В.</i>	
О схемах типа MUSCL и разрывном методе Галеркина .....	115
<i>Родионов А. В., Тагирова И. Ю.</i>	
О применении искусственной вязкости в схемах типа Годунова для борьбы с «карбункул»-неустойчивостью .....	117
<i>Сивков Д. А., Авдеев А. В.</i>	
Программные инструменты Intel для эффективных параллельных вычислений при моделировании физических процессов .....	118
<i>Сидоров М. Л., Пронин В. А.</i>	
Неструктурированная призматическая дискретизация сложных геологических структур в параллельном режиме .....	119
<i>Силаев Д. П., Харченко С. А., Ющенко А. А.</i>	
Развитие параллельного решателя СЛАУ во FlowVision в направлении AMG-подобных алгоритмов и SIMD оптимизации .....	120
<i>Силантьева И. Ю., Зуева Л. М., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н., Модестов Д. Г., Могиленских Д. В., Мокшин С. Ю., Никольшин М. В., Орлов В. Г., Язова Е. Ю.</i>	
Программа «ТАНДЕМ» и прототип графического интерфейса пользователя для обеспечения проведения связанных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторных установок .....	121
<i>Синькова О. Г., Янилкин Ю. В., Стаценко В. П., Чернышова О. Н., Фирсова Г. С.</i>	
Численное исследование влияния начального спектра возмущений на развитие гравитационного турбулентного перемешивания .....	122
<i>Софронов В. Н., Шемарулин В. Е.</i>	
Трехстадийные симплектические разностные схемы молекулярной динамики.	
Классификация, сравнительное численно-аналитическое исследование .....	123
<i>Стародубцев И. С.</i>	
Проект «Виртуальная рука» .....	124
<i>Сударева О. Ю., Богданов П. Б.</i>	
Гетерогенное программирование в рамках стандарта OpenCL .....	125

<i>Танненберг И. Д., Ермакова Ю. Е.</i>	
Численное моделирование нестационарных характеристик створок подпитки воздухозаборника .....	127
<i>Герентьев А. Б., Савихин С. А., Золотов С. А., Панкратов А. А., Борисов Д. Е.</i>	
Методы эффективного моделирования сложных процессов на высокопроизводительных вычислительных системах при помощи программного продукта CUMPS .....	128
<i>Титарев В. А., Беляев И. В., Скворцов Р. А.</i>	
Разработка методологии численного моделирования шума открытого ротора на неструктурированных сетках .....	129
<i>Титарев В. А.</i>	
Методы решения кинетических уравнений для задач аэродинамики высотного полета .....	130
<i>Фокин В. Б., Левашов П. Р., Поварницын М. Е., Хищенко К. В.</i>	
Континуально-атомистическое моделирование абляции металлов под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов .....	131
<i>Харрисон А. К.</i>	
Моделирование пыления и переноса .....	132
<i>Хархордин И. Л., Горев И. Л., Горев В. В.</i>	
Представление гидрогеологических объектов на численных геофильтрационных и геомиграционных моделях .....	133
<i>Хищенко К. В.</i>	
Уравнения состояния алюминия и оксида урана в волнах ударного сжатия и адиабатической разгрузки .....	134
<i>Храмченков М. Г., Храмченков Э. М.</i>	
Моделирование процессов массообмена в геологических и биологических системах .....	135
<i>Чекмарев Д. Т., Спириин С. В.</i>	
Применение параметрического семейства 8-узловых конечных элементов к решению трехмерных задач теории упругости .....	136
<i>Черевань А. Д., Надуев А. Г., Кожжаев Д. А.</i>	
Динамическое конфигурирование параметров универсального препроцессора с помощью языка XMLSchema для подготовки исходных данных задач моделирования на суперкомпьютерах .....	137
<i>Чернов Д. В.</i>	
Компоненты технического и программного обеспечения инструментальных средств проектирования систем на кристалле компании Altera corporation .....	138
<i>Чирков Д. В., Гудилин Д. А., Алимов Д. О.</i>	
Комплексные расчеты аэродинамических характеристик маневренного летательного аппарата в различной конфигурации и при различных условиях полета .....	139
<i>Чупрунов А. М., Сапожников Ф. А., Климов А. В.</i>	
Декларативно-модульное представление элементов графического интерфейса пользователя для программного комплекса Moloch .....	139
<i>Якушев В. Л., Филимонов А. В., Солдатов П. Ю., Киселева А. В.</i>	
Исследование возможностей применения вычислений на графических процессорах для решения разреженных слау .....	140
<i>Ялозо А. В., Козелков А. С., Силаев Д. П., Лашкин С. В.</i>	
Реализация алгоритма каскадного сбора глобального уровня в многосеточном решателе пакета программ ЛОГОС .....	142
<i>Янг А. Дж., Уайт А. Д., Яведани Я. Б., Андерсон К. С., Герц Д. А., Райзман Д. Б.</i>	
Обзор семейства магнитных генераторов ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса для исследования уравнений состояния .....	142

<i>Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Колобянин В. Ю., Городничев А. В., Гужова А. Р., Дегтяренко Л. И., Интяпина Н. П., Куделькин В. Г., Линяев С. А., Логинов Д. В., Потехин А. Л., Потехина Е. В., Разумков А. С., Стадник А. Л., Тарасов В. И., Топорова О. О., Турутина И. Ю., Шабуров В. М.</i>	
Код ЭГИДА для моделирования двумерных и трехмерных задач механики сплошной среды .....	143
<i>Янилкин Ю. В., Стаценко В. П., Чернышев Ю. Д., Топорова О. О., Колобянин В. Ю., Турутина И. Ю., Беляев С. П., Дмитриева А. С.</i>	
Численное моделирование трехмерного течения газа в роторе модельной газовой центрифуги игуассу .....	144

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ВОКРУГ ПРЕПЯТСТВИЙ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

*И. В. Абалакин, Н. С. Жданова, Т. К. Козубская*

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

Метод штрафных функций, относящийся к классу методов погруженных границ, применяется для моделирования препятствий в задачах аэродинамического обтекания [1]. Его использование позволяет избежать трудоемкого процесса построения расчетной сетки, в которой узлы отслеживают поверхность обтекаемого тела. В случае, если препятствие имеет сложную геометрическую форму, что чаще всего встречается в промышленных задачах, генерация такой сетки может занимать время, сопоставимое со временем счета самой задачи. Таким образом, использование метода погруженных границ является привлекательной альтернативой традиционному подходу к численному моделированию обтекаемых препятствий, требующему описания границ твердого тела сеточными узлами.

Другим важным преимуществом использования метода погруженных границ является его эффективное использование для численного расчета обтекания подвижных препятствий. При моделировании подобных задач обычно применяют не лишенные недостатков методы скользящих или деформирующихся сеток. Они требуют дополнительных временных и вычислительных ресурсов для переинтерполяции решения с сетки на сетку, и в ряде случаев их использование может вызвать снижение точности решения.

В работе приводится вычислительный алгоритм расчета сжимаемых течений вокруг препятствий, моделируемых методом штрафных функций. В рамках используемого подхода расчет ведется во всей области, включая обтекаемое твердое тело, а влияние препятствия на течение определяется штрафными функциями в уравнениях системы Навье-Стокса. Рассматривается несколько вариантов метода штрафных функций в зависимости от поставленного граничного условия на поверхности обтекаемого тела [2, 3].

Все расчеты проводятся на основе комплекса программ NOISEtte [4]. Для пространственной дискретизации уравнений на неструктурированных тетраэдральных сетках с определением переменных в узлах используется EBR схема [5] повышенной точности (для дозвуковых течений) и ее WENO версия (для сверхзвуковых течений) [6]. Интегрирование по времени проводится по неявной схеме 2-го порядка точности с использованием линеаризации по Ньютону разностной нелинейной системы уравнений. Получающаяся при этом система линейных уравнений решается стабилизированным методом бисопряженных градиентов (BiCGStub) с локальным предобуславливанием (ILU(0) и Якоби).

При программной реализации вычислительного алгоритма используется двухуровневое распараллеливание MPI+OpenMP. Использование OpenMP в дополнение к MPI позволяет повысить эффективность при расчетах на большом числе многоядерных процессоров. Параллельные алгоритмы реализованы, в том числе, и для решателя систем линейных уравнений, что при использовании метода штрафных функций особенно важно, поскольку этот подход приводит к ухудшению обусловленности матрицы системы.

Приводятся результаты параллельных расчетов серии модельных задач, демонстрирующих, что метод погруженных граничных условий может быть использован для моделирования граничных условий нескольких типов на поверхности препятствия. Рассматриваются как дозвуковые, так и сверхзвуковые течения. Также показываются результаты численного моделирования обтекания подвижного препятствия. Полученные характеристики течений сопоставляются с результатами расчетов с использованием традиционного подхода и доступными теоретическими значениями [2].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.BVV.21.0111).

### Литература

1. Peskin C. S. Flow patterns around heart valves: a digital computer method for solving the equation of motions: PhD thesis. Physiol., Albert Einstein Coll., Med. Univ. Microfilms. 378. 72–30.
2. Boiron O., Chiavassa G., Donat R. A high-resolution penalization method for large Mach number flows in the presence of obstacles // J. Comp. Fluids. 2009. 38. 703–714.
3. Brown-Dymkoski E., Kasimov N., Vasilyev O. V. A Characteristic-Based volume penalization method for arbitrary mach flows around solid obstacles // J. Comp. Physics. 2014. 262. 344–357
4. Абалакин И. В., Бахвалов П. А., Горобец А. В., Дубень А. П., Козубская Т. К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т. 13. С. 110–125.
5. Абалакин И. В., Козубская Т. К. Схема повышенной точности на основе реберно-ориентированной квазиодномерной реконструкции переменных для решения задач аэродинамики и аэроакустики на тетраэдральных сетках // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 8. С. 109–136.
6. Abalakin I. V, Bakhvalov P. A, Kozubskaya T. K. Edge-Based Methods in CAA // Lecture Series 2013-03 «Accurate and Efficient Aeroacoustic Prediction Approaches for Airframe Noise» / Ed. by C. Schram, R. Denos, E. Lecomte. Rhode-Saint-Genese: von Karman Institute for Fluid Dynamics. 2013.

### **КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫЕ EBR СХЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ**

*И. В. Абалакин, П. А. Бахвалов, А. П. Дубень, Т. К. Козубская*

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

EBR (Edge-Based Reconstruction) схемы [1–3] представляют собой относительно дешевый с вычислительной точки зрения метод, позволяющий проводить расчеты задач аэродинамики и аэроакустики на неструктурированных сетках с повышенной точностью. Повышенная точность численного результата достигается за счет использования квазиодномерной реконструкции переменных вдоль направления ребер сетки при вычислении потоков на грани контрольного объема. На трансляционно-симметрических сетках (т. е. сетках, имеющих равномерную решетчатую структуру) EBR схемы достигают своего максимально высокого (5-го – 6-го) порядка аппроксимации. По сути своей, эти схемы представляют собой обобщение конечно-разностного подхода с определением переменных в узлах на случай неструктурированных сеток.

Для расчета течений с трансзвуковыми и сверхзвуковыми скоростями, где требуется монотонизация алгоритма, разработана WENO-версия EBR схем [3].

В качестве примеров задач, решенных с помощью EBR схем, в докладе рассматривается моделирование трансзвукового течения вокруг клиновидного тела с обратным уступом, а также расчет аэродинамических и акустических характеристик вращения винта в кольце при осевом обтекании.

В первой задаче с использованием вихререзающего гибридного RANS-LES подхода IDDES исследовалось существенно трехмерное течение в донной области за обратным уступом (см. рис. 1 слева). При этом проводился анализ возникающих акустических нагрузок и поиск источников, ответственных за генерацию шума. Характерное число Рейнольдса задачи, рассчитанное

по длине пластины перед обратным уступом  $L$ ,  $Re_L = 7,239 \cdot 10^6$ . Корректность моделирования сложного турбулентного течения подтверждалась сравнением с соответствующими экспериментальными данными (см., например, рис. 1 справа).

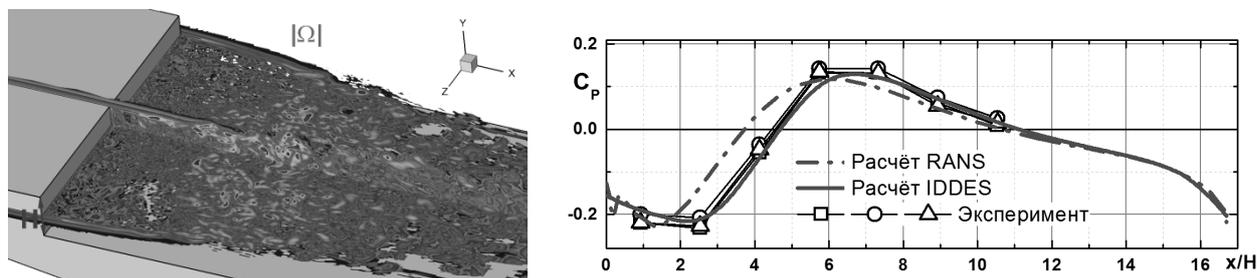


Рис. 1. Мгновенные поля модуля завихренности (слева) и осредненные профили коэффициента давления на поверхности (справа) за трехмерным обратным уступом клиновидного тела

В задаче о винте в кольце моделировалось течение, создаваемое винтом с 11 лопастями, расположенном в кольце постоянного сечения. Задача обладает осевой симметрией, поэтому рассматривалась одна лопасть в секторе с углом  $32.72^\circ$  и постановкой периодических граничных условий по азимутальному направлению (рис. 2). Расчеты проводились для различных частот вращения винта и углов установки лопасти.

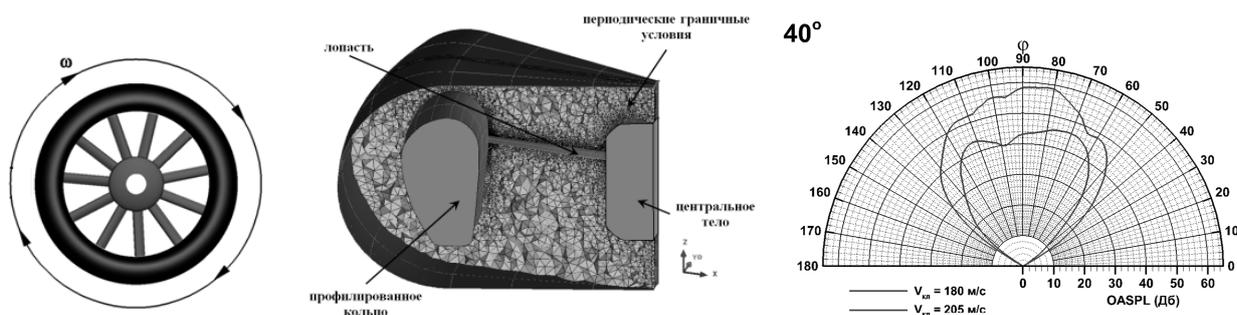


Рис. 2. Винт в кольце (слева), моделируемый сегмент винта (в центре) и общий уровень звукового давления для угла установки лопасти  $40^\circ$  (справа)

Моделирование задачи о винте проводилось на основе уравнений Эйлера во вращающейся неинерциальной системе координат, записанной относительно вектора скорости в абсолютной системе координат. Для оценки акустики в дальнем поле течения использовался интегральный метод Фокс Уильямса-Хокинга.

На основе полученных расчетных данных была проведена оценка силы тяги и крутящий момент для рассматриваемой конфигурации винта в кольце. Получены также распределение поверхностных акустических нагрузок, средние поля генерируемого винтом течения, а также диаграммы направленности общего уровня звукового давления (OASPL) на расстоянии 150 м от центра винта (рис. 2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект 12-01-00486-а) и РНФ (Проект № 14-11-00060).

## Литература

1. Abalakin I., Bakhvalov P., Kozubskaya T. Edge-based reconstruction schemes for prediction of near field flow region in complex aeroacoustic problems // International Journal of Aeroacoustics. 2014. Vol. 13, no 3&4. P. 207–234.

2. Абалакин И. В., Козубская Т. К. Схема повышенной точности на основе реберно-ориентированной квазиодномерной реконструкции переменных для решения задач аэродинамики и аэроакустики на тетраэдральных сетках // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 8. С. 109–136.

3. Abalakin I., Bakhvalov P., Kozubskaya T. Edge-Based Methods in CAA // Lecture Series 2013-03 «Accurate and Efficient Aeroacoustic Prediction Approaches for Airframe Noise» / Ed. by C. Schram, R. Denos, E. Lecomte. Rhode-Saint-Genese: von Karman Institute for Fluid Dynamics. 2013.

## КОММУНИКАЦИОННАЯ СЕТЬ СО СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ДАНЫХ 56 ГБИТ/С

*С. М. Абрамов, Ю. А. Климов, А. Б. Шворин*

Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский

Коммуникационная сеть является ключевым компонентом современных суперкомпьютеров. Доступные на рынке решения, например, коммуникационная сеть InfiniBand, не всегда способны удовлетворить требованиям, выдвигаемым для суперкомпьютеров сверхвысокой производительности. Поэтому многие организации (Cray, IBM, Fujitsu, NUDT) разрабатывают собственные коммуникационные сети: в современном списке Top500 за ноябрь 2013 г. [1] первые шесть суперкомпьютеров (реальной производительностью от 6,3 ПФлоп/с до 33,9 Пфлоп/с) используют заказные коммуникационные сети, специально разработанные для данных суперкомпьютеров, и они недоступны в качестве отдельных компонент. Суперкомпьютеры, занимающие первые места в списке, являются стратегическим ресурсом, и их поставки тщательно контролируются. Поэтому разработка собственных коммуникационных сетей для суперкомпьютеров (в том числе высшей производительности) является важной и актуальной задачей.

В ИПС им. А. К. Айламазяна РАН в 2014 г. завершена разработка высокоскоростной бескоммутаторной коммуникационной сети на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и активных оптоволоконных кабелей (АОК) [2]. Основной задачей проекта было: разработка и создание коммуникационной сети со скоростью передачи данных 56 Гбит/с. Данная скорость на сегодняшний день находится на уровне передовых доступных зарубежных решений, таких как InfiniBand FDR.

На рис. 1 показана разработанная плата коммуникационной сети с двумя подключенными АОК. На плате размещены четыре разъема QSFP+ для подключения АОК (по 56 Гбит/с), разъем PCI-Express Gen3 x8 (64 Гбит/с) для подключения к узлу вычислительной системы и основная микросхема ПЛИС Altera Stratix V GX. В настоящее время поддерживаются топологии соединения плат 2D-тор/решетка и полносвязанная топология. Использование ПЛИС позволяет реализовать поддержку других топологий, таких как сети Кэли.

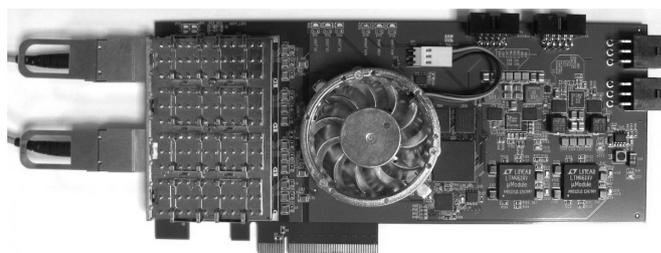


Рис. 1. Плата коммуникационной сети с двумя подключенными АОК

Ключевой особенностью проекта является разработка собственных активных оптоволоконных кабелей (АОК) со скоростью передачи данных 56 Гбит/с и длиной 50 метров [3]. Созданный задел позволяет разработать АОК со скоростью передачи данных 100 Гбит/с. В разработке АОК приняли участие соисполнители по проекту: российские фирмы ООО «Коннектор Оптикс» и ЗАО «Центр ВОСПИ».

В рамках проведенного первого тестирования разработанной коммуникационной сети получены следующие характеристики:

- темп выдачи сообщений – 50–75 млн. сообщений в секунду;
- скорость передачи данных по АОК – 6,2 ГБ/с;
- скорость передачи данных между процессорами – 4,7 ГБ/с (ограничивается скоростью PCI-Express Gen3 x8);
- задержка между процессорами – до 1,3 мкс.

Разработанная сеть установлена на экспериментальной вычислительной системе в ИПС им. А. К. Айламазяна РАН, на которой ведутся работы по дальнейшему развитию и повышению эффективности коммуникационной сети (в частности, с целью повышения скорости передачи данных). Ведутся работы по разработке коммуникационной сети следующего поколения со скоростью передачи данных 100 Гбит/с.

### Литература

1. Top500 Supercomputers [Electronic resource]. URL. Mode of Access: <http://top500.org/> (дата обращения 31.05.2014).
2. Абрамов С. М. и др. Высокоскоростной интерконнект на активных оптических кабелях и программируемых логических интегральных схемах // Национальный суперкомпьютерный форум (НСКФ-2013), Переславль-Залесский, 26–29 ноября, 2013.
3. Карачинский Л. Я. и др. Высокоскоростные многоканальные активные оптические кабели на основе вертикально-излучающих лазеров // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2013) Пермь, 16–18 октября, 2013.

### 3D КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПЛОШНЫХ СРЕД В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

*М. Х. Абузьяров, Е. Г. Глазова, С. В. Зефирова, А. В. Кочетков, С. В. Крылов*

НИИ механики ННГУ, г. Нижний Новгород

Разработанный комплекс предназначен для численного моделирования быстропротекающих динамических процессов взаимодействия разнородных сред, подверженных значительным формоизменениям. Основные проблемы при решении таких задач связаны с построением разностных сеток. В настоящее время существует два основных подхода решения этой проблемы. Первый – это использование Лагранжевых или Эйлерово-Лагранжевых сеток, связанных с границами сред, и второй – связанный с Эйлеровыми неподвижными сетками, граничные ячейки которых обрезаются границами сред, и требуется расчет этих обрезанных объемов. Оба подхода требуют сложных сеточных генераторов и существенного времени подготовки задачи для счета.

В данном комплексе эти проблемы решаются использованием двух разностных сеток, регулярной неподвижной Эйлеровой и подвижной локальной Лагранжево-Эйлеровой (ALE подход), сопровождающей контактные и свободные границы, поверхности ударных волн и фазовых переходов и другие возможные особенности решения, с взаимной интерполяцией сеточных параметров.

Для моделирования динамики жидкостей и газов, а также деформируемых твердых тел используется схема Годунова повышенной точности в Лагранжево-Эйлеровых переменных, единая как для уравнений Эйлера, так и уравнений Эйлера-Коши, описывающих деформирование твердого тела\*. Повышение точности схемы достигается за счет использования пространственного 3D решения задачи распада разрыва (3D space time dependent Riemann's Problem solver), зависящего от времени. Это же решение применяется для расчета взаимодействия на границе жидкости и твердого тела (Fluid Structure Interaction problem).

Комплекс не требует генераторов 3D сеток, пользователем задается только поверхность рассчитываемых сред в виде STL файлов, созданных средствами инженерной графики, что существенно упрощает задание данных и делает его удобным для использования непосредственно конструктором на этапе проектирования. Сброс информации происходит в STL формате и в формате SILO комплекса графических программ VISIT.

Приводятся результаты решения тестовых и прикладных задач, связанных с генерацией и распространением детонационных и ударных волн с последующим нагружением конструкций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00219, 13-08-97091, 14-08-00197, 14-08-31149).

## ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС

*П. А. Авдеев, О. Л. Александрова, Е. О. Артемова, В. А. Афанасьев, Р. А. Барабанов,  
В. В. Борляев, Д. Ю. Дьянов, И. А. Дяченко, А. В. Казанцев, Е. И. Корсакова, С. С. Косарим,  
М. В. Медведкина, С. В. Морозов, А. О. Наумов, М. М. Пристаи, Д. И. Разваров,  
Т. В. Резвова, В. Ф. Спиридонов, С. В. Стародубов, И. Ю. Тагирова, Е. А. Филимонкин,  
К. В. Циберев, А. А. Челаков, Е. В. Шувалова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В настоящее время разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах [1, 2]. Разработка пакета программ ЛОГОС ведется в тесном сотрудничестве с ведущими российскими институтами и предприятиями, имеющими опыт в создании и использовании инженерных кодов. Пакет программ ЛОГОС-Прочность позволяет проводить расчет статического и динамического деформирования конструкций с учетом контактного взаимодействия и процесса разрушения. Одной из особенностей пакета программ ЛОГОС-Прочность является высокий уровень распараллеливания смешанной модели (OpenMP+MPI), позволяющей проводить трехмерное комплексное моделирование на супер-ЭВМ с использованием тысяч процессорных ядер.

В докладе представлено описание функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС-Прочность, и приведены примеры его использования для решения сложных практических задач различных предприятий.

---

\*Abouziarov M., Aiso H., Takahashi T. An application of conservative scheme to structure problems. Series from research institute of mathematics of Kyoto university. Mathematical analysis in fluid and gas dynamics. 2004. No. 1353. P. 192–201.

## Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю. В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // XIII Международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. трудов. Саров, 2011.

2. Речкин В. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Дьянов Д. Ю., Наумов А. О., Косарим С. С., Филимонкин Е. А., Бартенев Ю. Г., Щаникова Е. Б., Ерзунов В. А., Рябов А. А., Вяткин Ю. А. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРАССЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

*В. Л. Авербух, Д. В. Манаков*

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург

Визуализация трассы выполнения параллельных и распределенных программ служит важным инструментом отладки правильности и эффективности параллельных вычислений. Накоплен значительный опыт разработок такого сорта. В литературе можно найти самые разные подходы к визуализации трасс выполнения параллельных программ. В докладе мы приведем как обзор существующих решений, так и предложения по новым подходам к разработке средств визуализации трасс.

Очевидно, что текст программы является ключевым видом отображения при отладке. В разработках 90-х годов, как правило, использовались те или иные текстовые виды отображения и представления различных графов выполнения программы с анимационным показом цепочек передач управления. Однако, главная проблема, возникающая при создании систем трассировки, заключается в огромном и все возрастающем объеме подлежащих анализу данных. Поэтому приемы, хорошо помогавшие при визуализации данных лет двадцать назад (например, использование *Visual Information Seeking Mantra* «*Overview first, zoom and filter, then details-on-demand*»), не срабатывают.

Активно используются методы визуализации трассы выполнения на базе разнообразных метафор визуализации, предполагающих использование анимации. В опубликованных в последние годы работах можно найти примеры использования в системах отладки правильности и эффективности разнообразных метафор. Среди них, в частности, традиционные метафоры города или ландшафта, а также новая метафора мозга. Идея визуализации работы мозга при предъявлении ему каких-либо стимулов перенесена на визуализацию активности программы или приложения (вызов процедур и функций, ввод/вывод и пр.). Однако интерпретация анимационных графических выводов, полученных в рамках интересной метафоры мозга не представляется очевидной. В системах отладки правильности и эффективности параллельных вычислений традиционно большую роль играет работа с графом вызовов программы. При двумерном представлении графа вызовов значительной по объему и сложной по структуре программы с большой глубиной вложенности вызовов

функций и большим количеством пользовательских функций возникают сложности в двумерном отображении протяженной структуры на экране. Поэтому созданы прототипные реализации представления графа вызовов на базе использования как «дву-с-половиной мерной», так и трехмерной графики. Реализованы представления графа вызовов на базе метафоры здания и метафоры молекулы. Рядом авторов проведен сравнительный анализ метафор и построенных на их базе двумерных и трехмерных изображений для представления сущностей параллельного программирования (прежде всего, трасс выполнения программ). В тоже время представляется важным не только проверять пригодность метафор для решения поставленных конкретных задач, но и формализовать оценку качества графических выводов, полученных при тех или иных методах визуализации. Методы оценки необходимо разрабатывать на основе формальной модели с последующей верификацией и валидацией как метафор, так и самих результатов визуализации. Так один и тот же кусок кода может выполняться на разных процессорах за разное время. Очевидно, что возникающие временные интервалы могут рассматриваться в рамках теории возможности или информационного разрыва. Теоретические исследования полезны и в плане создания новых метафор. В ряде систем компьютерной визуализации хорошо зарекомендовало себя применение комплексного или множественного вида отображения. При этом подразумевается использование нескольких разделенных видов отображения, между которыми в процессе интерпретации и взаимодействия устанавливаются взаимосвязи. (Можно привести аналогию из области черчения, когда трехмерное тело представляется в виде трех проекций.) Для рассмотрения и формализации данного примера можно ввести несколько групп базисных функций, таких как «Информативность и избыточность» и «Полнота и точность», обеспечивающих целостное восприятие и детализацию. Результатом применения множественного вида отображения может являться не только сокращение объема информации, но и понижение размерности, в том числе и когнитивной. Для решения задачи представления трассы выполнения параллельных программ мы предлагаем использование комплексного вида отображения, включающего:

- например, представление графа вызовов программы, реализованного, в частности, на базе метафоры промышленного ландшафта или метафоры молекулы;
- текстового представления программы;
- виды отображения для представления данных об эффективности параллельных программ, используемые в системах информационной визуализации, например, «информационная стена» («информационная фреска») или «параллельные координаты»;
- возможности «полета» над «программным ландшафтом» или между «атомами» молекулы, причем маршрут «полета» увязывается с выводом текста программы;
- возможности изменения уровня детализации как «метафорического», так и текстового вывода трассы за счет «подъема/спуска» при полете.

Необходима разработка средств визуального сопровождения процессов разработки, анализа и отладки программного обеспечения. То есть реализация системы визуализации должна вестись совместно с пользователями, разработчиками сложного программного обеспечения параллельных и распределенных вычислений, с учетом их повседневной деятельности по отладке правильности и эффективности программных комплексов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы», проект 12-П-1-1034.

**МЕТОД РАСЧЕТА МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ЛЮБЫХ ЧИСЛАХ МАХА**

*А. А. Аксенов, Г. Ю. Бартнев, А. А. Дядькин, С. В. Жлуктов, В. И. Похилко*

ООО «ТЕСИС», г. Москва

Моделирование течений несмешивающихся жидкостей и газов представляет собой одну из самых сложных задач вычислительной гидродинамики. Вместе с тем возможность численного моделирования таких движений сплошной среды является важным для практических применений таких, как например, приводнение космических аппаратов с двигательной тормозной системой, диспергирование жидкости форсунками, старт ракет с подводных лодок, загрязнение автомобилей в дождь, гидропланирование автомобильных колес, процессы химических производств, абляция теплозащитного слоя боеголовки и космических аппаратов при входе в плотные слои атмосферы планет, движения судов и подводных лодок [1]. В таких задачах зачастую возникает две фазы, одна из них движется практически как несжимаемая жидкость, а другая может иметь сверхзвуковую скорость.

В программном комплексе FlowVision для расчета движения жидкостей с контактными границами реализован многофазный метод VOF. Каждая континуальная фаза в расчетной ячейке имеет значение относительного объема (функция VOF). Суммарный объем фаз равен 1. По значениям этой функции происходит восстановление границы раздела между двумя жидкостями. После восстановления контактной границы поверхности происходит разрезание области расчета на подобласти, которые заняты своими фазами. Ячейки, через которые проходят контактные границы, разрезаются на части в соответствии с объемами, занимаемыми «чистыми» фазами. На границе раздела ставятся граничные условия связи для всех переменных в обеих фазах (скорость, давление, параметры турбулентности и т. д.). Уравнения в обеих фазах считаются одновременно неявным методом. Для решения уравнений Навье-Стокса применяется новый алгоритм расщепления по физическим переменным, который позволяет проводить расчеты сверх- и гиперзвуковых течений с шагом по времени, в десятки и сотни раз превышающим явный шаг. Более того, метод совместим с технологией подвижных тел, также реализованной в программном комплексе FlowVision. Перенос функции VOF осуществляется явным методом с использованием схемы реконструкции решения внутри ячейки с учетом физического смысла VOF. Все уравнения решаются параллельно с учетом гетерогенности распараллеливания современных компьютеров (распределенная и общая модель памяти одновременно) [2]. Особое внимание в методе, изложенном в настоящем докладе, уделяется моделированию тех частей жидкости, которые не могут быть разрешены расчетной сеткой – капли, пузырьки либо тонкие пленки жидкости. В традиционном методе VOF эти образования, не разрешаемые расчетной сеткой, просто удаляются из расчета, в настоящем же методе VOF они учитываются в рамках дисперсионного решателя.

В докладе показаны примеры решения промышленных задач. Одна из задач - это приводнение нового космического аппарата при включенных двигателях торможения. Здесь исследуется взаимодействие сверхзвуковых струй с поверхностью воды, при котором возникает волнообразование и диспергирование жидкости. Другой задачей является минометный старт ракеты из подлодки. Здесь исследуются вопросы взаимодействия газовых струй с ракетой и вытеснение воды из шахты при одновременном движении самой ракеты.

### Литература

1. Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Петров А. С., Печенюк А. В., Станков Б. Н. Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов // Судостроение. 2013. № 4.

2. Аксенов А. А., Дядькин А. А., Харченко С. А. Исследование эффективности распараллеливания расчета движения подвижных тел и свободных поверхностей в FlowVision на компьютерах с распределенной памятью // Вычислительные методы и программирование. 2009. Т. 10, № 1.

## ГЕТЕРОГЕННАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ МНОГОГРАННОЙ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

*А. Ю. Алейников*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В комплексе программ ЛОГОС-Газодинамика создается новый модуль статической декомпозиции неструктурированной многогранной расчетной сетки для проведения расчетов на гетерогенной вычислительной системе. Излагаются два подхода к осуществлению сбалансированной декомпозиции. В ходе проведения декомпозиции сетки возможен учет различий в производительности элементов гетерогенной вычислительной системы. Также принимается во внимание топология коммуникационной среды и различие в пропускной способности между вычислительными элементами. Показано существенное отличие гетерогенной декомпозиции от однородного разбиения сетки. Приводятся результаты гетерогенной декомпозиции неструктурированных расчетных сеток.

## ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ

*В. М. Амосков, Д. Н. Арсланова, А. М. Базаров, А. В. Белов, В. А. Беляков, В. Н. Васильев,  
Е. И. Гапионок, В. П. Кухтин, Е. А. Ламзин, М. С. Ларионов, Н. А. Максименкова,  
С. Е. Сычевский, А. А. Фирсов, Н. А. Шатиль*

НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Работа выполнялась с целью адаптации имеющейся вычислительной технологии для анализа и последующей оптимизации магнитных систем левитации и стабилизации в рамках расчетной поддержки разработки и создания магнитолевитационного транспорта с электродинамическим принципом подвешивания (ЭДП).

Работа условно может быть разделена на три части. Первая часть включала:

- адаптацию разработанного в ОАО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» программного обеспечения для численного моделирования различных типов магнитного подвеса,
- создание соответствующих вычислительных моделей, степень детализации которых адекватна требованиям конструкторской разработки и изготовления систем.

В ходе адаптации была проведена модернизация программного обеспечения, для организации высокопроизводительных параллельных вычислений. В расчетах использовалась многопроцессорная суперЭВМ, разработанная и произведенная в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Такая организация вычислений

обеспечила возможность детального анализа практически всех типов ЭДП для значимых режимов и сценариев движения.

Вторая часть работы заключалась в сопоставлении результатов натурального эксперимента, выполненного в Лоуренсовской национальной лаборатории (г. Ливермор, США), и результатов численного анализа этого эксперимента, проведенного с использованием разработанных вычислительных моделей.

Столь пристальное внимание к данным натурального эксперимента объясняется:

- во-первых, высокой достоверностью результатов экспериментов, выполненных одним из признанных мировых лидеров в разработках систем такого рода,
- во-вторых, в РФ практически отсутствуют опубликованные столь систематические и согласованные наборы экспериментальных данных,
- в-третьих, диапазон вариации параметров, анализируемых в ходе натурального эксперимента, достаточно широк для полноценной верификации вычислительных программ и моделей.

Как результат, была проведена верификация независимого программного обеспечения, разработанного в РФ для расчетной поддержки проектирования, разработки и создания магнитолевитационных транспортных систем.

Третья часть работы заключалась в анализе различных типов электродинамического подвеса, выполненных на основе сверхпроводниковых систем и систем на постоянных магнитах. Рассматривались различные варианты исполнения проводящих элементов пассивной путевой структуры. Создана база данных, которая является научно-техническим заделом для дальнейших исследований и разработок.

## ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУРАХ РЕАКТОРА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ

*В. М. Амосков, А. М. Базаров, В. А. Беляков, Е. И. Гапионок, В. П. Кухтин, Е. А. Ламзин,  
С. Е. Сычевский*

НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Эксплуатация токамака ИТЭР предполагает необходимость планирования и предварительного численного моделирования физических экспериментов с тем, чтобы не выйти за границы допустимого операционного пространства установки. Решение задачи управления плазмой и реактором требует наличия симуляторов, моделирующих поведение плазмы и многочисленных баз данных, характеризующих работу этих систем.

Ряд специфических требований к симуляторам, в частности, высокое быстродействие используемых численных алгоритмов и малое время работы с базами данных, предполагает глубокую модернизацию существующих численных кодов. Организация высокопроизводительных параллельных вычислений с использованием многопроцессорных ЭВМ позволяет в значительной степени решить поставленные задачи.

В работе представлены первые результаты, связанные с разработкой «инженерного» симулятора, предназначенного для анализа электромагнитных процессов установки ИТЭР, с использованием численного кода TYPHOON [1]. В расчетах использовалась многопроцессорная суперЭВМ, разработанная и произведенная в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Интегро-дифференциальная постановка комплекса программ ТУРНООН [1] задачи расчета вихревых токов в проводящих структурах сводится к краевой задаче Коши [2]. Рассматриваемая область ограничена пространством, занимаемым проводящими структурами.

Для решения задачи достаточно определить функцию источников [2]. Решение задачи имеет вид:

$$u(x, t) = \int_0^t d\tau \int_V G(x, \xi, t - \tau) f(\xi, \tau) d\xi, \quad (1)$$

где  $G(x, \xi, t - \tau)$  – функция источника (влияния), являющаяся аналогом функции Грина [2], и представляющая собой отклик системы в точке  $x$  на единичное импульсное воздействие источника  $\delta_+(\xi, t - \tau)$ , расположенного в точке  $\xi$ .

В практических приложениях при анализе квазистационарных электромагнитных полей источниками обычно являются катушки с токами. При анализе режимов работы токамаков к источникам относится также распределенный по сечению ток плазмы. Функция влияния находится численным способом.

Будем считать заданным сценарий изменения полного тока  $I(t)$  в источнике поля. Для описания этого сценария будем использовать аппроксимирующую функцию  $g(t)$  следующего вида:

$$g(t) = \sum_j a_j \varphi(t - t_j), \quad (2)$$

а в качестве базисных выберем линейные функции:

$$\varphi(t - t_j) = \begin{cases} 0 & t \leq t_j, \\ (t - t_j)/\theta & t > t_j, \end{cases} \quad j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Выбор базисных функций (3) обусловлен соображениями практического удобства и предполагаемого табличного представления исходных данных с малыми временными шагами на характерном интервале наблюдения, что позволяет использовать кусочно-линейную аппроксимацию для описания сценария тока в источнике с заданной точностью. При этом базисная функция для описания источников  $I'(t)$  имеет вид:  $\varphi'(t - t_j) = U_+(t - t_j)/\theta$ , где  $U_+(t - t_j)$  – единичная ступенчатая функция, отвечающая линейному во времени росту тока источника.

Таким образом, рассчитав отклик системы (функцию источника) на элементарное воздействие источника, численно равное  $U_+(t - t_j)/\theta$  и соответствующее линейному во времени росту тока, и определив коэффициенты  $a_j$  линейной комбинации (2), принятой для описания сценария тока источника, можно получить решение задачи на всем интервале наблюдения в виде суперпозиции решений от каждого воздействия  $a_j U_+(t - t_j)/\theta$  в отдельности. Окончательно, решение краевой задачи Коши строится путем суперпозиции решений от каждого источника поля в отдельности.

Принцип суперпозиции допускает эффективную численную реализацию с использованием параллельных вычислений и многопроцессорных систем.

## Литература

1. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612496: Программный комплекс для численного моделирования квазистационарных вихревых токов в тонких проводящих пространственных оболочечных конструкциях сложной геометрической формы (ТУРНООН 2.0) / Амосков В. М., Белов А. В., Беляков В. А., Белякова Т. Ф., Гапионов Е. И., Гаркуша Д. Б., Кокотков В. В., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Сычевский С. Е., Филатов О. Г. Реестр программ для ЭВМ. 12 ноября 2003.

2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966.

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМОЙ ЛАГРАНЖЕВОЙ СЕТКЕ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В МЕТОДИКЕ Д

*Л. А. Андреевских, И. М. Епишков, Н. В. Корепова, Д. М. Линник, О. О. Муругова,  
В. Б. Титова, Ю. Д. Чернышев*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В работе описывается методика расчета трехмерных задач газовой динамики на адаптивно-встраиваемых лагранжеских сетках. Основная идея решения уравнений газодинамики с использованием адаптивно-встраиваемых сеток заключается в уменьшении размеров ячеек исходной расчетной сетки в процессе счета в локальных зонах с большими градиентами газодинамических переменных. Такой подход позволяет в ряде случаев значительно повысить точность численного решения, не перегружая при этом расчет избыточно мелкой сеткой и делая его более экономичным.

Методика расчета на адаптивно-встраиваемых сетках за счет своей экономичности особенно актуальна для задач в трехмерной постановке и, в частности, для численного моделирования горения взрывчатых веществ (ВВ) с использованием модели кинетики детонации Морозова–Карпенко (МК) [1]. При использовании данной модели неизбежно возникают высокие требования к размеру ячеек счетной сетки, что отчасти связано с физическими параметрами применяемого взрывчатого состава. Например, для ВВ на основе ТЭН (тетранитропентаэритрита) размер химзоны составляет приблизительно 0,03 мм. Ясно, что счетные сетки с размером ячеек около 0,1 мм, которые обычно применяются для моделирования процесса детонации в других ВВ (например, на основе ТАТБ (тринитротриаминобензола)) с кинетикой МК, не всегда можно применять к ВВ на основе ТЭНа. Поэтому подход, связанный с использованием в трехмерных расчетах модели кинетики детонации, ранее не мог широко применяться в связи с его высокими требованиями к вычислительным ресурсам.

В работе кратко описаны алгоритмы использования адаптивно-встраиваемых сеток применительно к лагранжеской методике Д [2], и приводятся результаты численного моделирования одного эксперимента по определению влияния слабых ударных волн на распространение детонационной волны в прутках взрывчатого вещества на основе ТЭНа с использованием описываемой методики. Полученные результаты расчетов показали хорошее описание экспериментальных результатов.

### Литература

1. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Ольхов О. В. Расчетное моделирование с опорой на эксперименты инициирования и развития детонации ВВ на основе ТАТБ с учетом десенсибилизации при взаимодействии ударной и детонационной волн: Препринт. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995.
2. Софронов И. Д., Делов В. И., Дмитриева Л. В., Артемьев А. Ю., Будников В. И., Вершинин В. Б., Дмитриев Н. А., Корепова Н. В., Линник Д. М., Малиновская Е. В., Муругова О. О., Садчиков В. В., Самигулина Р. З., Сусллова С. Ю., Хитева Е. С., Чернышев Ю. Д. Методика Д для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–50.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЬ/ГАЗ В ПОЛОСТИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ВАЛОМ

*А. В. Бадерников, Е. В. Печеник, А. Н. Лисицин*

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

При разработке современных авиационных двигателей особое внимание уделяется увеличению ресурса, снижению массы и габаритов двигателя.

Ресурс двигателя в значительной степени зависит от ресурса подшипников опор. В свою очередь, ресурс подшипников напрямую зависит от качества смазывания и степени охлаждения элементов подшипника. Ужесточающиеся требования к массогабаритным и эксплуатационным характеристикам двигателя диктуют направление уменьшения размеров масляной системы и количества масла, используемого для смазки и охлаждения подшипников при увеличении их ресурса.

В настоящее время проектирование масляных картеров осуществляется на основании успешного предыдущего опыта аналогичных работ, а функционирование спроектированной масляной системы проверяется только в процессе испытаний двигателя. Решение возникающих проблем в этом случае приводит к серьезным временным и финансовым затратам.

Для того чтобы одновременно увеличить ресурс подшипника, снизить массу и габариты масляной системы требуется современный инструмент анализа, позволяющий моделировать течение двухфазной среды масло/воздух в масляной системе двигателя.

В работе представлены результаты расчетов двухфазного течения жидкость/газ, полученные на упрощенной модели маслокартера. В качестве упрощенной модели масляного картера была взята

полость с вращающимся валом [1], изображенная на рис. 1. Выбор данной задачи обусловлен:

- возможностью моделирования основных физических процессов, протекающих в масляном картере;
- относительно простой геометрией модели;
- наличием экспериментальных данных [1].

Работа выполнялась с целью определения актуальных моделей многофазного течения [2] для моделирования процессов, протекающих в масляных картерах опор ГТД. Расчеты проводились в ПК ANSYS FLUENT v. 14.5 при помощи Эйлеровой гомогенной модели многофазного течения с учетом сил поверхностного натяжения и массовых сил. Задача решалась для различных значений расходов жидкости и газа [1]. Критерием расчета и эксперимента служил объем воды, стационарно присутствующий в полости во время работы установки.

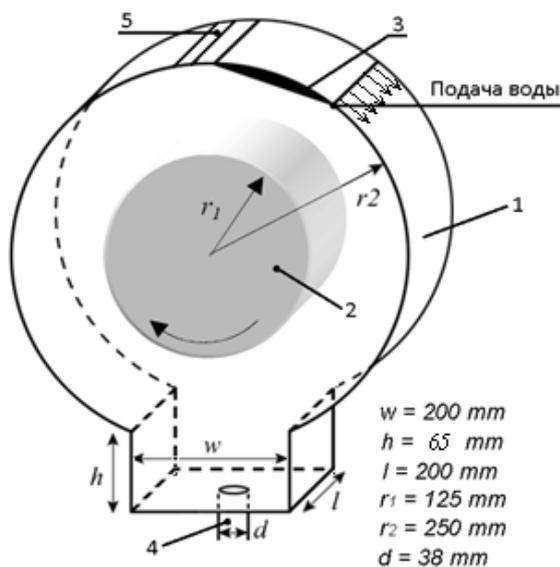


Рис. 1. Полость с вращающимся валом: 1 – основная полость; 2 – вал; 3 – генератор пленки; 4 – труба откачки; 5 – подача воздуха

## Литература

1. Chandra B., Simmons K., Pickering S. Factors affecting oil removal from an aero engine bearing chamber // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, UK, June 14–18, 2010.
2. Ansys Advantage. Инженерно-технический журнал [русская редакция]. 2009. № 11.

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИЕНТНОЙ ДИНАМИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ В АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ

*Д. А. Бадьин<sup>1,3</sup>, П. Б. Богданов<sup>2</sup>, В. В. Журавлев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Всероссийский НИИ автоматики им. Н. Л. Духова, г. Москва

<sup>2</sup>НИИ системных исследований РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга  
МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Дисковые течения являются важной частью моделей объектов, представляющих большой интерес для современной теоретической и наблюдательной астрофизики, таких как рентгеновские двойные системы, активные ядра галактик, протопланетные диски в нашей галактике или протогалактические – в ранней Вселенной.

С момента создания теории дисков [1] во многом остается без ответа ключевой вопрос о механизме переноса углового момента из центральных областей к периферии, что необходимо для радиального переноса массы и конверсии гравитационной потенциальной энергии в тепло- и наблюдаемое излучение. Традиционно подразумеваемая турбулентная вязкость не может быть универсальным объяснением. Так, спектральный анализ малых возмущений в сдвиговом и существенно гиперзвуковом потоке с кеплеровским профилем угловой скорости (соответствует движению в центральном поле тяготения) показывает, что он не только локально, но и глобально устойчив (отсутствуют экспоненциально растущие моды возмущений), а гидродинамические симуляции нелинейных локальных возмущений не дают в нем самоподдерживающейся турбулентности [2]. В этих условиях становится актуальным исследование альтернативных вариантов усиления переноса углового момента.

Поскольку в сдвиговом сжимаемом течении оператор эволюции возмущений не нормален и его собственные векторы не ортогональны, мы обратили внимание на возможность транзиентного роста нелокальных неосесимметричных трехмерных возмущений в немодальном подходе [3]. До сих пор транзиентное усиление возмущений кеплеровским потоком исследовалось в локальной постановке и в приближении несжимаемой жидкости либо для упрощения рассматривалось лишь двумерное поле возмущений скорости в плоскости диска [4].

Целью данной работы являлось построение численного алгоритма поиска профилей возмущений дискового течения (сингулярный вектор ненормального оператора), обеспечивающих наибольший рост энергии возмущений (сингулярное значение оператора) за заданное время. Для этого использовался итерационный алгоритм, описанный в [3], который включает многократное решение задачи эволюции возмущений вперед и назад по времени, а также оптимизацию начальных условий в выбранной энергетической метрике. Необходимость проведения большого количества вычислений над большими массивами данных делает безальтернативным применение высокопроизводительных параллельных вычислений.

В докладе будут представлены высокоскоростные алгоритмы решения задач динамики малых возмущений, обобщаемые на широкий класс дисковых и торовых течений. Оценены время вычислений, ускорение и эффективность алгоритмов на системах с поддержкой программных моделей OpenMP, OpenCL.

### Литература

1. Shakura N. I., Syunyaev R. A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. and Astrophys.* 1973. Vol. 24. P. 337–355.
2. Shen Y., Stone J. M., Gardiner T. A. Three-dimensional compressible hydrodynamic simulations of vortices in disks // *The Astrophysical Journal*. 2006. Vol. 653. P. 513–524.
3. Schmid P. J. Nonmodal stability theory // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2007. Vol. 39. P. 129–162.
4. Zhuravlev V. V., Razdoburdin D. N. A study of transient dynamics of perturbations in Keplerian discs using a variational approach // *In press Mon. Not. Roy. Astron Soc.* 2014.

## АНАЛИЗ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «ДИНАМИКА-3»

*В. Г. Баженов, Н. С. Дюкина, А. И. Кибец*

НИИ механики НГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Предлагаемые строительными нормами методы оценки сейсмостойкости сооружений используют упрощенную модель грунтового основания и применимы только для малозаглубленных сооружений. Исследование сейсмостойкости заглубленных сооружений и примыкающих к ним подземных трубопроводов подразумевает включение в рассмотрение массива, прилегающего к сооружению грунта, большие размеры которого позволяют минимизировать отраженные от границ грунтового массива волны вблизи сооружения. Выбор мелкой разностной сетки, необходимой для точного описания сооружения и высокочастотных сейсмических осцилляций, делает численное моделирование крупногабаритных задач сеймики крайне трудоемким даже на суперкомпьютерах. Предлагаемый авторами метод анализа сейсмостойкости заглубленных сооружений [1] существенно сокращает вычислительные затраты и учитывает эффекты контактного взаимодействия стенок сооружения с грунтовым основанием.

Для описания движения сплошных сред в лагранжевых переменных в неподвижной декартовой системе координат применяются уравнения, следующие из вариационного принципа баланса мощностей работ, решение которых при заданных начальных и граничных условиях основывается на вариационно-разностном методе дискретизации по пространственным координатам и явной схеме интегрирования по времени [2]. Массив грунта представляется прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в 20 раз превосходят характерные размеры основания сооружения в плане – в совокупности со специальными мало отражающими волны граничными условиями. Этого достаточно для исключения влияния краевых эффектов на результаты расчета вблизи сооружения. Жесткие грунты моделируются однородной или многослойной идеально упругой средой, для мягких грунтовых оснований применяется трансверсально-изотропная модель, учитывающая изменение характеристик грунта с глубиной [3]. Расчетная область находится в поле сил тяжести. Расчет полей перемещений и напряжений от действия сил тяжести осуществляется с применением процедуры гашения кинетической энергии в момент достижения максимума до ее установления с заданной точностью. В зависимости от расположения гипоцентра землетрясения, к нижней или боковой границе грунта прикладывается сейсмическое воздействие в виде компонент вектораскорости  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ , вычисленных так [1], чтобы вблизи сооружения воспроизводилась заданная акселерограмма землетрясения. Между сооружением и грунтом моделируется контактное взаимодействие стрением.

Описанные методы решения, алгоритмы моделирования контактного взаимодействия и учета поля сил тяжести реализованы в сертифицированном программном комплексе «Динамика-3» (сер-

тификат соответствия № РОСС RU.ME20.HO0338 Госстандарта России, Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013, выданный Научно-техническим центром по ядерной и радиационной безопасности). Распараллеливание алгоритма позволило сократить вычислительные затраты и повысить эффективность численных исследований. Благодаря этому стал технически возможным многократный пересчет задачи с различными вариантами воздействия, сформированного вероятностными методами из экспериментальной сейсмограммы. Результаты таких расчетов позволяют отражать опыт многих землетрясений, что повышает их достоверность.

Разработанная вычислительная модель динамического взаимодействия сооружения с грунтом применена для оценки сейсмостойкости подземных трубопроводов, примыкающих к ответственным сооружениям АЭС Бушер (Иран), Нововоронежской АЭС-2, Калининской, Ростовской АЭС (Россия), Белорусской АЭС (Белоруссия) по заказу ОАО «НИАЭП» (Н. Новгород). Проведены исследования поведения сооружений в зависимости от параметров сейсмического воздействия и различных геометрических и физических параметров сооружения и грунта [4].

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-593.2014.8 и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-01-31113, № 14-08-01129).

### Литература

1. Дюкина Н. С., Баженов В. Г. Методы численного исследования сейсмостойкости заглубленных сооружений. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, 2012.
2. Баженов В. Г., Чекмарев Д. Т. Решение задач нестационарной динамики пластин и оболочек вариационно-разностным методом. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2000.
3. Дюкина Н. С., Кибец А. И., Жестков М. Н. Анализ сейсмических колебаний заглубленных сооружений с учетом трансверсально-изотропного основания // Пробл. прочн. и пластичн. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 40–46.
4. Баженов В. Г., Дюкина Н. С. Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Выч. мех. сплошных сред. 2012. Т. 5, № 1. С. 19–24.

### ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ SOLID-SHELL ТЕХНОЛОГИИ

*Р. А. Барабанов, Д. Ю. Дьянов, И. И. Каныгин, Е. А. Филimonкин, К. В. Циберев*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В модуле статической прочности пакета программ ЛОГОС разработана и реализована технология расчетов деформирования конструкций путем восполнения структурных конечных элементов (оболочечных и балочных) до объемных элементов сплошной среды (шестигранники, треугольные призмы). Эта технология обеспечивает возможность проведения расчетов нелинейного деформирования тонкостенных конструкций, в которых присутствуют оболочечные и балочные элементы, за счет ранее реализованного нелинейного функционала для объемных элементов. Приведено описание базовых процедур и алгоритмов реализованного метода; представлены результаты тестовых расчетов в линейной и нелинейной постановках; проведено сравнение результатов с эталонными решениями.

## ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. УЧЕТ ЭФФЕКТОВ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

*Р. А. Барабанов, Д. Ю. Дьянов, Е. А. Филимонкин, К. В. Циберев*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах [1–2]. Одной из составных частей данного пакета программ является модуль решения задач по расчету напряженно-деформированного состояния конструкций при квазистатических термосиловых воздействиях, основанный на методе конечных элементов. Этот модуль позволяет проводить численное решение задач статической прочности как в линейной, так и в нелинейной постановках. Ползучесть – один из видов так называемой физической, или материальной, нелинейности, обусловленной нелинейной зависимостью между тензорами деформаций и напряжений или зависимостью материальных параметров от времени или истории нагружения. Одну сторону этого явления – рост во времени деформаций при постоянной нагрузке – называют собственно ползучестью, а другую – уменьшение во времени напряжений при постоянной деформации – релаксацией. В общем случае ползучести с течением времени изменение деформаций сопровождается изменением напряжений. Обычно ползучесть учитывается при расчете и конструировании деталей машин, находящихся в процессе эксплуатации длительное время в нагретом состоянии.

В данной работе приводятся подходы и алгоритмы, используемые в пакете программ ЛОГОС для учета эффектов ползучести при численном моделировании процесса квазистационарного деформирования конструкции.

Для демонстрации работоспособности и эффективности реализованных функциональных возможностей по моделированию ползучести в докладе представлены результаты численного расчета задач, проведенного с использованием пакета программ ЛОГОС. Проводится сравнительный анализ полученных результатов с эталонными решениями.

### Литература

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю. В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.

2. Речкин В. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Дьянов Д. Ю., Наумов А. О., Косарим С. С., Филимонкин Е. А., Бартенев Ю. Г., Щаникова Е. Б., Ерзунов В. А., Рябов А. А., Вяткин Ю. А. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.

**РАСПРЕДЕЛЕННО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
ТРЕХМЕРНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «VIZIReflex»**

*А. В. Барахвостов, Р. В. Городничев, А. А. Лусин, Е. А. Марфина, П. Н. Филиппов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики, г. Снежинск

В последнее время в математическом отделении РФЯЦ-ВНИИТФ быстрыми темпами развиваются трехмерные методики численного моделирования механики сплошной среды. Для повышения точности моделирования увеличиваются размерности расчетных сеток. Результаты расчета задач могут содержать сотни миллионов ячеек расчетной сетки, а размеры файлов с результатами достигают сотни гигабайт.

Для обработки таких данных используются распределенно-параллельные системы визуализации, работающие на многопроцессорных вычислительных комплексах. Существует ряд подобных систем: «ParaView» [1], «VisIt» [2] и т. д. Однако вышеперечисленные системы являются универсальными и не в полной мере отвечают запросам пользователей. Добавление новых или адаптация существующих функциональных возможностей в ряде случаев является нетривиальной задачей. В связи с этим, в РФЯЦ-ВНИИТФ было принято решение о создании собственной распределенно-параллельной системы визуализации «VIZIReflex», учитывающей особенности конкретных трехмерных методик математического отделения.

«VIZIReflex» – современный программный продукт, предназначенный для визуализации и анализа научных данных. Программа разработана на языке C++ с использованием библиотек Qt, VTK, MPI.

Основными особенностями системы «VIZIReflex» являются:

1. Многоплатформенность.
2. Возможность обработки больших объемов данных.
3. Ориентированность на потребности конкретных методик.
4. Поддержка различных типов данных.
5. Богатые функции визуализации.

В докладе приведены общая архитектура программы, описание интерфейса пользователя и реализованных инструментов, особенности работы программы в распределенном режиме и т. д.

### **Литература**

1. Henderson A. The Paraview Guide [Electronic resource] Kitware, Inc., 2004. <http://www.kitware.com>.
2. VisIt User's Manual version 1.5. [Electronic resource]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2005. Mode of Access: <http://www.llnl.gov/visit>.

## КОМПЛЕКС БИБЛИОТЕК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РЕШАТЕЛЕЙ СЛАУ LPARSOL ВЕРСИИ 3

*Ю. Г. Бартенева<sup>1,2</sup>, В. А. Ерзунов<sup>1</sup>, А. П. Карпов<sup>1</sup>, Д. А. Петров<sup>1</sup>, И. А. Пищулин<sup>1</sup>,  
А. Н. Стаканов<sup>1</sup>, Е. Б. Щаникова<sup>1</sup>, И. Е. Капорин<sup>3</sup>, О. Ю. Милюкова<sup>4</sup>, С. А. Харченко<sup>5</sup>,  
И. Н. Коньшин<sup>5</sup>, И. Б. Мееров<sup>2</sup>, А. В. Сысоев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

<sup>3</sup>Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, г. Москва

<sup>4</sup>Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

<sup>5</sup>ОАО ТЕСИС, г. Москва

В отчете [1] американских специалистов обращено внимание на важность продолжения инвестиций в библиотеки решателей (PETSc, HYPRE, Trilinos, SuperLU и другие) и исследований по преодолению ограничений архитектуры компьютеров, что перекликается с исследованиями в России [2–4].

В 2010–2013 гг. ряд предприятий совместно разработали библиотеку решателей СЛАУ в виде комплекса библиотек LParSol [4], который включает библиотеки PMLP/ParSol, TParFBSS, VC\_RAN\_SLAU [4,2] с единым пользовательским интерфейсом и средства подключения Intel PARDISO MKL, BoomerAMG HYPRE [5], MUMPS, AMG Parallel Toolbox [6] (два последних разработаны [7, 8]).

Объединяющая оболочка LParSol обеспечивает решение потока СЛАУ с одним и разными коммуникаторами MPI. Ниже перечислены свойства и эффект:

формирование СЛАУ не зависит от решателя	=> решать можно любым;
внешнее задание решателя и его настроек	=> менять, не меняя код;
ориентация на поток СЛАУ	=> снижает затраты, адаптивность;
итерационные решатели	=> предобусловленные в подпространствах Крылова.

В LParSol для распределенных СЛАУ реализованы:

- итерационные решатели CG, BiCGStab, CR, BiCRStab, GMRES, SOFGMRES;
- сквозной предобусловливатель IC2/ILU2 [3];
- блочный предобусловливатель (ADI, mcILU0, IC0/ILU0, ICk/ILUk, ICt/ILUt);
- блочно-перекрытый предобусловливатель (ICt/ILUt, IC2/ILU2/MILUt, LLt/LU);
- крупноблочно-перекрытый предобусловливатель (IC2/ILU2);
- грубосеточный корректировщик поправки предобусловливания;
- оптимизированный селективный AMG [6, 8];
- оптимизированный для блочных матриц LDLt-решатель MUMPS.

Решение СЛАУ P4 из задачи прочности разными методами

Решатель	p	Dens Fct	N iter	Fct Time	Iter Time	Total Time
PARDISO*Intel® MKL	12	~20.	0	–	–	430.4
MUMPS+ParMetis	64	~20.	20	118.3	1.6	119.9
PMLP Schwartz(PARDISO)	192	< 20.	85	15.3	106.2	121.5
VC_RAN_Schwartz(IC2)	385	4.3	6965	4.1	105.2	109.3
TParBSS(IC2_float)	384	8.9	447	80.0	34.	114.

Особенностями LParSol являются:

- единый формат СЛАУ и файл параметров (приложение не зависит от решателя);
- одинарная и двойная точность предобусловливания (IC/ILU, IC2/ILU2) [3, 4];
- точечный и блочный разреженный формат матриц в ряде решателей [3, 7];
- оптимизирующие переупорядочивания матрицы (RCM, ND, др.);
- наследование построенных структур решателя предыдущей СЛАУ;
- адаптивный выбор для потока СЛАУ наискорейшего решателя [9].

Ряд методов, демонстрирующих либо лучшее качество предобусловливания, либо более высокий параллелизм, либо то и другое: AMG, коррекция на грубой сетке, многоцветные ILU, прямой мультиточечный LLt решатель, полиномиальный предобусловливатель [2], находится в стадии испытаний.

## Литература

1. Exascale Mathematics Working Group. J. Dongarra, J. Hittinger, J. Bell, etc. Applied Mathematics Research for Exascale Computing: LLNL TR-651000, 2014.
2. Капорин И. Е. Дискретный метод наименьших квадратов для полиномиального предобусловливания несимметричных матриц // Оптимизация и приложения. Вып.3. Сб. трудов отдела проблем прикладной оптимизации ВЦ РАН / под ред. В. Г. Жадана. М.: Изд-во ВЦ РАН, 2013. С.120-139.
3. Коньшин И. Н., Сушко Г. Б., Харченко С. А. и др. Решение плохообусловленных разреженных СЛАУ большого размера с помощью PARFBSS // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / под ред. Р.М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С.76-78
4. Бартенев Ю. Г., Бондаренко Ю. А., Ерзунов В. А. и др. Комплекс LParSol для решения СЛАУ // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С.34-36.
5. Henson V. E., Yang U. M. BoomerAMG: a Parallel Algebraic Multigrid Solver and Preconditioner // Applied Numerical Mathematics. 2002. 41. 155–177.
6. Liebmann M. Algebraic Multigrid Methods on GPU-Accelerated Hybrid Architectures. Institute for Mathematics and Scientific Computing, University of Graz, 2011.
7. Лебедев С. А., Мееров И. Б., Сысоев А. В. и др. Оптимизация и применение пакета MUMPS для решения трехмерных стационарных задач прочности на кластерных системах // Вестник УГАТУ. 2014. Принято к печати.
8. Бартенев Ю. Г., Карпов А. П., Крючков А. Ю., Пищулин И. А. Адаптация некоторых решателей СЛАУ для арифметических ускорителей NVIDIA // Труды XIV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 30–32.
9. Ерзунов В. А., Горбунов А. А. Механизм адаптивного выбора решателя в библиотеке PMLP/Parsol // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 1. С. 55–62.

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ ГИБРИДНАЯ ТОПОЛОГИЯ KNS ДЛЯ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ АППАРАТНОГО МОДУЛЯ СМПО-10GA-1

*В. Г. Басалов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Около двадцати лет в ВНИИЭФ создаются суперкомпьютеры семейства МП-Х-У как с использованием коммерческих коммуникационных сетей (Mugicom, InfiniBand), так и с использованием систем межпроцессорного обмена собственной разработки в суперкомпьютерах МП-3, МП-3Т, МП-СМПО-2D и МП-СМПО-3D.

В настоящее время в ИТМФ разработана отечественная система межпроцессорного обмена СМПО-10GA-1. Областью применения аппаратных компонент СМПО-10GA-1 является создание высокопроизводительных коммуникационных сетей для вычислительных систем разного уровня производительности: от компактных супер-ЭВМ до больших систем, состоящих из тысяч вычислительных узлов. 64-узловая вычислительная система МП-СМПО-3D, созданная на базе СМПО-10G-1 с топологией MultiTor, выдержала тестовые испытания.

Создание современных высокопроизводительных коммуникационных сетей (КС), объединяющих десятки тысяч вычислительных модулей в единую суперкомпьютерную вычислительную среду, ставит перед разработчиками много сложных технических проблем. Ниже перечислены основные требования к современным КС:

- расширяемость;
- простота;
- надежность;
- отказоустойчивость;
- стоимость и потребляемая мощность;
- управление загрузкой каналов.

Все эти требования имеют крепкую взаимосвязь, и поэтому удовлетворение отдельных требований не приведет к достижению приемлемого результата.

Топология коммуникационной сети в значительной степени определяет эффективность и стоимость самой КС, а как следствие, и эффективность всего мультипроцессорного вычислительного комплекса. Топология КС напрямую зависит от архитектуры ее аппаратных средств.

Для архитектуры СМПО-10GA-1 уже было ранее предложено несколько возможных топологий коммуникационной сети: TreeTor, MultiTor и TopГК, но поиск новых перспективных топологий продолжался. Попытка разработать иерархическую топологию для архитектуры СМПО-10GA-1 не увенчалась успехом. Небольшое количество портов в коммутаторном блоке не позволяло создать расширяемую, с действительно малым диаметром топологию коммуникационной сети. Также препятствием явился довольно сложный алгоритм маршрутизации.

В данном отчете представлен результат адаптации архитектуры СМПО-10GA-1 к новой гибридной топологии KNS, предложенной испанскими учеными на международной конференции в сентябре 2013 г. в Барселоне, для вычислительных систем эксафлопсной производительности.

В докладе подробно описаны разработанные самостоятельно механизмы и алгоритмы адаптивной системы маршрутизации, поддерживающие данную топологию. Метод алгоритмически коммутируемой маршрутизации был адаптирован к топологии KNS. Поскольку аппаратный модуль СМПО-10GA-1 состоит из двух типов устройств адаптерных блоков СМПО-10GA-AD и коммутаторных блоков СМПО-10GA-SW в докладе описаны два соответствующих алгоритма маршрутизации, обеспечивающие гарантированную доставку пакета из ВМ источника в ВМ приемник.

В докладе приведены основные характеристики (диаметр, ширина бисекции и стоимость, выраженная в количестве необходимого оборудования: адаптеров, коммутаторов и соединительных кабелей) различных топологий коммуникационных сетей на базе архитектуры СМПО-10GA-1, топологии коммуникационной сети «Ангара» и различных топологий коммуникационных сетей на базе архитектуры InfiniBand для вычислительной системы, содержащей примерно 8192 вычислительных модуля.

Сравнение показало, что КС на архитектуре СМПО-10GA-1 с топологией KNS имеют параметры, сравнимые с параметрами КС на архитектуре InfiniBand с топологией Fat Tree.

## СИСТЕМА СОБЫТИЙНО-УПРАВЛЯЕМОЙ ТРАНСЛЯЦИИ LiME

*М. О. Бахтерев*

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН,  
г. Екатеринбург

Разработка процессора с новой системой команд в настоящее время подразумевает и разработку трансляторов с некоторых языков высокого уровня на ассемблер с этой новой системой команд. Если система команд существенно не отходит в основных принципах своей организации от принципов, давно используемых в CISC, RISC и VLIW системах, то задача разработки трансляторов существенно упрощается, так как в этом случае можно положиться на существующие развитые программные пакеты, такие как LLVM и GCC. Однако, если система команд отличается от традиционных, использование этих пакетов может оказаться весьма затруднительным.

Предлагаемые распространенными системами трансляции абстракции для описания наборов инструкций целевых процессоров всегда подразумевают, что после записи значения  $V$  в регистр, который указывается в команде именем  $N$ , все последующие чтения данных по имени  $N$  до следующей записи выдают значение  $V$ .

Это отражает являющуюся одной из основных для CISC, RISC и VLIW процессоров идею о строго последовательном изменении состояния памяти компьютера (набора регистров и системной памяти), через которое передается информация между шагами вычисления, описываемыми инструкциями. Соблюдение такого порядка вычислений существенно ограничивает эффективность традиционных архитектурных решений, в рамках которых высокая скорость обработки информации обеспечивается либо существенными дополнительными объемами оборудования и потребляемой энергии (процессоры с внеочередным исполнением), либо ограничениями на класс эффективно исполняемых программ (мультипроцессоры GPGPU, которые можно рассматривать как векторные RISC-машины).

Однако, как показывает опыт разработки мультиклеточных процессоров, можно поддерживать высокую скорость исполнения программ без использования большого объема дополнительного оборудования и без ограничений на класс эффективно исполняемых программ. Для этого приходится отказаться от семантики последовательного исполнения инструкций и передачи данных между операциями вычисления только через последовательно изменяемое состояние системной памяти и регистров. Такой отказ делает невозможным использование традиционных систем трансляции и зачастую приводит к отказу от развития новых архитектурных идей, так как разработка систем трансляции весьма затратна. Но архитектура мультиклеточных процессоров, кроме повышения эффективности исполнения кода, обладает рядом других важных и необходимых на практике возможностей, среди которых продолжение исполнения программы при выходе из строя части исполнительных устройств, и оптимизация конфигурации функциональных устройств для конкретной зада-

чи во время ее исполнения с отключением некоторых из них для экономии энергии. Эти возможности достаточно привлекательны, чтобы заняться разработкой новой системы трансляции.

В этой разработке самой первой из самых трудоемких задач следует решить задачу по переводу исходного текста программы в удобную для дальнейшей работы промежуточную форму. Для мультиклеточных процессоров такой удобной формой является представление программы в виде графа потока управления, в котором узлами служат линейные блоки, описываемые в свою очередь графами потоков данных.

Сложность построения такого представления программы по абстрактному синтаксическому дереву вызвана тем, что для каждого узла дерева существует большое количество вариантов связи графов, построенных для дочерних деревьев, в более крупную структуру. Дело усложняется и тем, что варианты связывания в узле на некотором уровне дерева могут зависеть от результатов связывания в узлах на уровнях дерева выше и ниже.

Для построения корректных связей требуется анализировать все эти варианты и при программировании на традиционных языках описывать такой анализ длинными многопроходными структурами анализа шаблонов (pattern matching). Это и является самой трудоемкой частью разработки транслятора в промежуточное представление, требующей от программистов крайне высокой квалификации и утомительного внимания к деталям.

Однако в свое время нами был предложен подход к описанию распределенных вычислительных процессов в виде динамически конструируемых графов потоков данных, призванный решить проблему сложности связи обрабатываемых данных в параллельных программах. Одна из особенностей этого метода, позволяющая снижать сложность разработки параллельных программ, заключается в возможности постепенно достраивать структуру вычисления в некоторой области имен по возникающим в ходе этого вычисления именованным событиям получения новых результатов. Эта особенность, как ожидалось, должна была позволить существенно упростить декомпозицию распределенного вычисления на независимые компоненты и последующую композицию их результатов с целью получения общего результата. Упрощение этих задач, в свою очередь, должно было снизить трудоемкость разработки параллельных программ. Мы опробовали наш метод для программирования некоторых параллельных алгоритмов, и он оправдал наши ожидания.

При связывании графа в узле синтаксического дерева программы из графов в дочерних деревьях этого узла возникают проблемы, похожие на те, что возникают при композиции и декомпозиции распределенных вычислительных процессов. Возможно, такая схожесть имеет глубокую, строго математическую причину, так как весьма схожую структуру имеют формализмы рекурсивных последовательных взаимодействующих процессов и рекурсивные мю-типы.

Руководствуясь этим подобием, мы разработали систему трансляции LiME, в основе которой лежит динамическое построение графа программы по принципам, что лежат в основе системы для программирования распределенных вычислительных процессов RiDE. Граф выстраивается путем применения форм, аналогов правил RiDE, по событиям готовности входов, для которых достраиваются ребра, ведущие в новый участок графа, описываемого формой. После активации формы возникают новые выходы, указывающие на узлы достроенного графа, и новые формы, потенциально готовые к последующим активациям. Этот процесс почти полностью повторяет процесс динамического построения графа потока данных в системе RiDE. Этот метод построения графа программы мы и называем событийно-управляемой трансляцией.

На практике мы опробовали нашу систему в разработке транслятора с языка Си99 на ассемблер мультиклеточных процессоров. Этот опыт показал, что описывать процесс построения графа в виде набора активируемых по событиям форм в некотором смысле проще, чем создавать программу с аналогичной функциональностью на одном из традиционных языков программирования. Здесь можно провести такое сравнение: в одном из самых компактных трансляторов Си99 – Tiny C Compiler – основной цикл трансляции реализован в 6200 строках кода на Си99 (без учета вспомогательных процедур). Нам удалось реализовать аналогичный цикл всего в 2500 строках кода для системы LiME.

Таким образом, в ходе этой работы мы показали, что принципы, заложенные в основу системы программирования распределенных параллельных приложений RiDE, достаточно универсаль-

ные, мощные и подходят для описания даже таких сложных взаимосвязей между вычислительными процедурами, которые возникают на некоторых этапах компиляции программ. Кроме этого, мы смогли уточнить и развить саму модель программирования RiDE, сделав ее более подходящей для описания сложно устроенных потоков данных.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы», проект 12-П-1-1034.

## **УНИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА «GEOMGRID2» ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕПРОЦЕССИНГА ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*О. В. Беломестных, С. В. Гагарин, Е. А. Приб, А. А. Ушкова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики, г. Снежинск

В РФЯЦ-ВНИИТФ на протяжении многих лет создаются программные комплексы численного моделирования в области механики сплошной среды (МСС). Постоянно растет роль разработки эффективных и информативных методов подготовки данных на расчет. Система «GeomGrid2» была разработана для обеспечения функциональности двумерного препроцессинга в рамках единой системы.

Система «GeomGrid2» обладает современным эргономическим интерфейсом. Пользовательский интерфейс разработан максимально просто и интуитивно понятен для освоения новыми специалистами. Система «GeomGrid2» позволяет визуальнo контролировать весь процесс формирования задачи, благодаря разработке функций и алгоритмов для визуализации геометрии, сеток и частиц в графическом окне.

В докладе представлена общая функциональность системы для работы с геометрическими и сеточными данными, а также алгоритмы автоматического распределения веществ по ячейкам сетки.

Система «GeomGrid2» позволяет формировать начальную геометрию системы несколькими способами:

- созданием средствами системы «GeomGrid2»;
- импортом из САПР «AutoCAD»;
- импортом данных задачи, рассчитанной на некоторый момент времени другим комплексом программ численного моделирования.

Все способы взаимодополняемы, что позволяет создавать геометрическую модель системы, объединяя ее из разных форматов хранения данных.

Система «GeomGrid2» работает как с регулярными, так и с нерегулярными сетками. Для построения сеток используются как собственные алгоритмы системы, так и внешние, разработанные комплексами программ математического моделирования. В системе «GeomGrid2» для загрузки программ построения, оптимизации и локальной корректировки сеток используется технология подключаемых модулей (плагинов).

Некоторые комплексы программ численного моделирования для дискретизации модели используют поля точечных масс – частиц. В системе «GeomGrid2» разработаны методы для обеспечения процесса подготовки данных для наборов частиц. В докладе демонстрируются два способа построения полей частиц в системе: в контурах областей без сетки и в ячейках сетки. Первый способ используется для построения частиц для неподвижного (на начальный момент времени) этапа расчета задачи, второй способ необходим для начала расчета задачи с некоторого момента времени

расчета (продолжения расчета задачи), полученного от другого комплекса программ численного моделирования.

Для ускорения процесса построения сеток и наборов частиц в областях задачи используется технология распараллеливания с использованием фоновых потоков. В докладе представлены временные характеристики распараллеливания.

В системе «GeomGrid2» разработаны алгоритмы распределения веществ по ячейкам сетки. В докладе приведены временные и численные сравнительные характеристики отработки методов.

Комплексы программ численного моделирования для начала расчета задачи используют файлы, записанные в определенных форматах. В докладе представлен набор файлов для выгрузки данных в разные форматы данных.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ILES-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ШУМА В СТРУЯХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Л. А. Бендерский, Д. А. Любимов*

Центральный институт авиационного машиностроения им. П. И. Баранова, г. Москва

Комбинированный RANS/ILES-метод высокого разрешения [1] применен к расчету истечения дозвуковых и нерасчетных сверхзвуковых струй из сопел разной геометрии, а также к расчету натекания нерасчетной сверхзвуковой струи на стенку, расположенную перпендикулярно струе, исследованию влияния поверхности аэродрома и наклонной стенки (отбойника) на течение в нерасчетной сверхзвуковой струе. У стенок течение описывалось с помощью метода URANS с моделью турбулентности Спэларта-Аллмараса, вдали от них – с помощью ILES. Под ILES подразумевается LES с неявной подсеточной моделью: ее функции выполняет схемная вязкость. Интегрирование по времени выполнялось по неявной схеме с помощью технологии dual time stepping. Высокое разрешение метода достигалось вычислением параметров на гранях расчетных ячеек в методе Роу с помощью монотонной малодиффузионной разностной схемы 9-го порядка [1]. Расчетный код был распараллелен с помощью технологии OpenMP.

Были выполнены расчеты истечения дозвуковых холодных струй  $T_j/T_a = 0.9$  и горячих струй при  $T_j/T_a = 2.7$  из конического и шевронных сопел с различным углом наклона шевронов. Акустическое число Маха во всех случаях было  $M_a = 0.9$ . Расчеты выполнялись на сетках, содержащих  $2.8\text{--}3.1 \times 10^6$  ячеек. Число  $Re = 1.3 \times 10^6$  при  $T_j/T_a = 0.9$  и  $Re = 0.2 \times 10^6$  при  $T_j/T_a = 2.7$ . Получено хорошее соответствие по параметрам турбулентности и осредненной скорости на оси струи для струй из всех исследованных сопел с экспериментальными данными [2]. Для расчета шума струй был применен метод FWH в сочетании с экономичным подходом forward time stepping method. Для исследованных струй получено хорошее соответствие с экспериментом по общему уровню шума в диапазоне углов наблюдения  $\theta$  от  $50\text{--}130^\circ$ . По 1/3-октавным спектрам в зависимости от типа струи и угла наблюдения отличие от данных эксперимента не более 2–3 дБ в диапазоне чисел Струхала  $Sh$  от 0.01–0.05 до 3–8.

Для нерасчетных сверхзвуковых струй из биконического сопла при  $\pi_c = 4$  и полной температуре на входе в сопло 300 и 600 К расчеты проводились на сетках, содержащих  $3.1\text{--}4.5 \times 10^6$  ячеек. По параметрам течения и турбулентности получено удовлетворительное совпадение с данными экспериментов и расчетами с помощью LES других авторов [3] на значительно более мелких сетках. Выполнен анализ влияния увеличения температуры струи на длину начального участка и уровень турбулентных пульсаций параметров течения в струе.

На сетках, содержащих  $1.1-1.6 \times 10^6$  ячеек, исследовано влияние температуры на входе в сопло на параметры течения и турбулентности на стенке в задаче натекания нерасчетной сверхзвуковой струи из сужающегося дозвукового сопла на перпендикулярную струе стенку. Расстояние от среза сопла до стенки было равно  $h/D = 4.16$ ,  $\pi_c = 4.0$ , и полная температура на входе в сопло была 300, 400 и 600 К. Получено удовлетворительное соответствие с экспериментом и расчетом других авторов с помощью LES.

Численно исследовано взаимодействие сверхзвуковой нерасчетной струи с поверхностью аэродрома и отбойником. На сетке с  $2.8 \times 10^6$  ячеек выполнен совместный расчет течения в биконическом сопле и нерасчетной сверхзвуковой струе с  $\pi_c = 4.0$ , для полной температуры на срезе сопла  $T_0 = 300$  К и  $T_0 = 600$  К. Дополнительно на сетке, содержащей  $3.1 \times 10^6$  ячеек, был выполнен расчет свободной струи с теми же параметрами. Получено хорошее совпадение расчетов с данными [4] по параметрам течения и турбулентности, а также по распределению SPL в ближнем поле струи. Установлено, что максимум интенсивности турбулентности (отнесено к скорости на срезе сопла) 15 % наблюдается около отбойника. Приведено сравнение распределения осредненных параметров на оси струи и параметров турбулентности в слое смешения в пристеночной струе для  $T_0 = 300$  К и  $T_0 = 600$  К с распределением этих же параметров в свободной струе на том же режиме истечения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00951-а.

### Литература

1. Любимов Д. А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // ТВТ. 2012. Т. 50, № 3. С. 450-466.
2. Bridges J., Broun C.A. Parametric testing of chevrons on single flow hot jets // AIAA Paper 2004-2824. 2004.
3. Liu J., Corrigan A., Kailasanath K., Ramammurti R., Heeb N., Munday D., Gutmark E. Computational study of shock-associated noise characteristics using LES // No 2199.
4. Liu J., Corrigan A., Kailasanath K., Ramammurti R., Heeb N., Munday D., Gutmark E. Impact of deck and jet blast deflector on the flow and acoustic properties of imperfectly expanded superson // AIAA P. 2013.

### ВЫЧИСЛЕНИЯ ПО ЗАПРОСУ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ

*А. Ю. Берсенева, Н. А. Ваганова, П. А. Васёв, В. В. Гусарова,  
А. С. Игумнов, М. Ю. Филимонов*

Институт математики и механики УрО РАН,  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

В докладе представлена математическая модель и технология создания пакетов прикладных программ и удобного интерфейса для удаленного доступа при комплексном моделировании на суперЭВМ нестационарных трехмерных температурных полей в многолетней мерзлоте от добывающей скважины на кустовой площадке северного нефтегазового месторождения с учетом наиболее существенных физических и природных факторов, приводящих к нелинейным граничным условиям в используемых моделях.

В качестве основной математической модели, в соответствии с работами [1–3], для учета излучения от каждой скважины используется уравнение контактной (диффузионной) теплопроводности

сти с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода – подход, позволяющий решать задачу типа Стефана, без явного выделения границы фазового перехода [4]. Эта методика апробирована на 8-северных нефтегазовых месторождениях и показала расчетную точность 5 % при сравнении с экспериментальными данными.

Для удобного доступа пользователя к вычислительной программе была создана специальная система, реализующая вычисления по запросу [5]. Система представляет собой веб-сайт, на котором зарегистрированный пользователь может:

- задать начальные данные для вычисления;
- подать команду на запуск вычисления, которое далее проводится на вычислителе через его систему планирования задач;
- получить результаты вычисления и их визуализацию;
- просмотреть архив вычислений.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы УрО РАН «Арктика» 12-1-4-005.

### Литература

1. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A. Simulation of thermal stabilization of soil around various technical systems operating in permafrost // *Applied Mathematical Sciences*. 2013. 7 (141-144). P. 7151–7160. DOI: 10.12988/ams.2013.311669.
2. Ваганова Н. А., Филимонов М. Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // *Вестник НГУ. Сер. Математика, механика, информатика*. 2013. Т. 13, № 4. С. 37–42.
3. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A. Simulation of thermal fields in the permafrost with seasonal cooling devices // *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference IPC*. 2012. 4. P. 133–141. DOI: 10.1115/IPC2012-90287.
4. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. *Вычислительная теплопередача*. М.: Едиториал УРСС, 2003.
5. Васёв П. А., Один подход к вычислениям по запросу // *Труды XIV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование»* / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 51.

## ПРЯМОЕ ОДНОМЕРНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВУХСЛОЙНЫХ СРЕДАХ И ВОЛНОВЫЕ УРАВНЕНИЯ С ДИСПЕРСИЕЙ

*Ю. А. Бондаренко, В. Н. Софронов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Интерес к исследованию керамик вызван возможностью получения технологически новых типов композитных материалов с новыми полезными свойствами с помощью оптимального выбора компонент и их объемного содержания [1]. Для моделирования поведения микронеоднородных композитных материалов широко используются асимптотические методы осреднения [2]. Подобные методы обоснованы в основном только для линейных задач с длинноволновыми и низкочас-

тотными (в некотором смысле гладкими) усредненными решениями и не приспособлены для расчета ударно – волновых процессов.

Работа посвящена построению эталонных численных решений, описывающих взаимодействие звука или иного воздействия (слабой или сильной ударной волны) с периодической многослойной средой. Такие решения предназначены для отбора и калибровки усредненных моделей.

Рассмотрены варианты линейных, слабо-нелинейных и сильно-нелинейных (ударно-волновых) задач. В качестве линейной и слабо нелинейной выбрана задача, предложенная в [3]. В этой одномерной задаче исследуется в газодинамическом приближении распространение возмущений в покоящейся периодической среде, образованной вольфрамом и парафином. Линейному и слабо нелинейному варианту соответствуют граничные условия на поршне  $u_{\text{гран}}/C \approx 3 \cdot 10^{-5}$  и  $u_{\text{гран}}/C \approx 10^{-2}$ . В этой задаче после прохождения основной волной тридцати и более периодов профили давления и скорости приобретают характерную (для волнового уравнения с дисперсией) структуру с крупномасштабными осцилляциями большой амплитуды с длиной волны порядка нескольких периодов и с экспоненциально затухающим профилем на фронте основной волны. Такая структура формируется многократным отражением (с размножением) скачков сжатия и разрежения от границ между разными веществами.

Показано, что в линейном случае полученные эталонные решения хорошо описываются известными асимптотическими решениями [4] отобранного (по нескольким критериям) волнового уравнения с дисперсией

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} - (C_{\text{эфф}})^2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{L^2 D_{\text{эфф}}}{12} \frac{\partial^4 F}{\partial t^2 \partial x^2}$$

с хорошим количественным описанием тонких особенностей численного решения.

Имеются существенные различия в расчетах линейных и слабо нелинейных задач. При наличии слабой нелинейности амплитуда длинноволновых осцилляций монотонно растет с ростом  $t$ , приближаясь к 100 %. Кроме того, длина осцилляций в окрестности фронта растет гораздо медленнее, чем в линейном случае, показатель степени  $a$  в зависимости  $Z \sim t^a$  примерно в два раза меньше, чем в линейном случае.

Распространение сильной ударной волны (УВ) в покоящейся периодической слоежке рассмотрено на примере задачи «прохождение УВ по смеси двух газов», которая использовалась в целом ряде работ как тестовая при построении моделей замыкания термодинамических параметров в смешанных ячейках [5]. В задаче с сильной УВ структура крупномасштабных осцилляций профилей со временем выходит на стационарный режим. Это также отличает данную задачу от линейного и слабо нелинейного случаев, в которых длина волны крупномасштабных осцилляций увеличивается с ростом  $t$  по степенному закону.

Есть надежда, что нелинейные обобщения рассмотренного волнового уравнения с дисперсией окажутся пригодны для описания эталонных решений слабо нелинейного случая и, возможно, подойдут для нелинейного случая с сильной УВ.

## Литература

1. Власов А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Яновский Ю. Г. Влияние размера включений на механические свойства эластомерных композитов // Доклады Академии наук. 2012. Т. 443, № 4. С. 435–437.
2. Бахвалов Н. С., Панасенко Г. П. Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композитных материалов. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 352 с.
3. Куропатенко В. Ф. Скорость звука в многокомпонентной смеси // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446, № 4. С. 401–403.

4. Сердюкова С. И. Экзотическая асимптотика для линейного гиперболического уравнения // Доклады Академии наук. 2003. Т. 389, № 3. С. 305–309.

5. Гончаров Е. А., Колобянин В. Ю., Янилкин Ю. В. Метод замыкания уравнений лагранжевой газодинамики в смешанных ячейках, основанный на равенстве скоростей компонентов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 100–105.

## СОГЛАСОВАНИЕ СЕТКИ И ТОЧНОСТЬ СЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВУКА С ГРАНИЦАМИ МЕЖДУ ВЕЩЕСТВАМИ В РАЗНОСТНЫХ СХЕМАХ ОДНОМЕРНОЙ ЛАГРАНЖЕВОЙ ГАЗОДИНАМИКИ

*Ю. А. Бондаренко, В. Н. Софронов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Для разностной схемы Годунова [1] в линейном случае в той же работе показано, что точность описания взаимодействия звука с границей разных веществ заметно улучшается, когда сетка согласована по акустической толщине

$$\frac{\Delta x_{\text{лев}}}{C_{\text{лев}}} = \frac{\Delta x_{\text{прав}}}{C_{\text{прав}}}. \quad (1)$$

Позже для разностной схемы типа «крест» в [2] показано, что энтропийные следы на границах разных веществ, возникающие в лагранжевых методиках с искусственной вязкостью после прохождения ударной волны, можно заметно уменьшить, если сетку согласовать аналогично (1), только вместо скоростей звука надо использовать скорости ударной волны.

Рассмотрено несколько разностных схем одномерной газовой динамики на лагранжевых сетках («крест», схема с искусственной антидисперсией СИАД [3], схема Годунова и схема Кабаре [4]) в линейном приближении и без учета искусственных вязкостей. Для них вычислены разностные коэффициенты отражения звуковых возмущений от границы разных веществ и построены разностные законы сохранения акустической энергии.

В разностных схемах на разнесенных пространственных сетках («крест» и СИАД) разностный коэффициент отражения совпадает с аналитическим (полученным для дифференциальных уравнений акустики) тогда и только тогда, когда сетка на границе разных веществ согласована по акустической толщине. В разностных схемах Годунова и Кабаре (на неразнесенных пространственных сетках) разностный коэффициент отражения звуковых возмущений всегда (независимо от способа согласования сетки) совпадает с аналитическим значением. Все полученные формулы разностных коэффициентов отражения применимы и для резкого перехода размеров ячеек сетки в однородном веществе.

В качестве примера рассмотрена задача о прохождении звука по слоистой периодической системе [5]. Для нее проведено две серии расчетов на сходимость на сетках, равномерных по массе, и на сетках, согласованных по акустической толщине. Сеточные нормы погрешностей типа  $L_1$ , полученные в этих расчетах и показанные на рис. 1 и 2, демонстрируют явное преимущество правила (1). Здесь для достижения одинаковой точности на сетках, равномерных по массе, требуется более чем в десять раз больше машинного времени, чем на сетках, согласованных по акустической толщине.

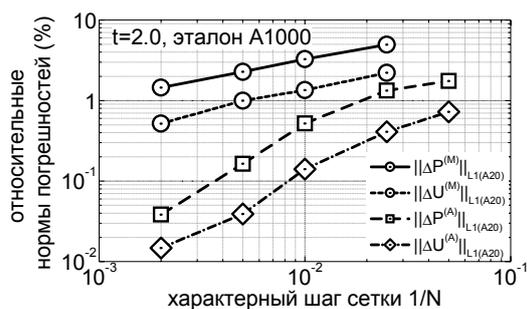


Рис. 1. Зависимость норм погрешностей от сетки,  $N$  – число ячеек на одном периоде

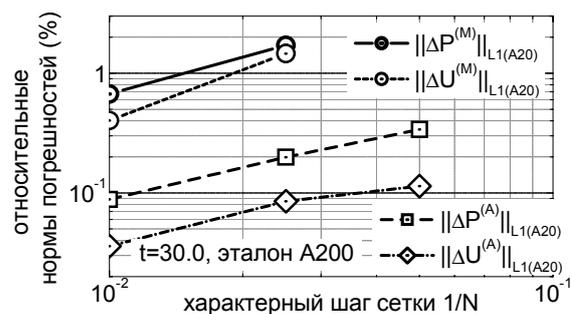


Рис. 2. Зависимость норм погрешностей от сетки,  $N$  – число ячеек на одном периоде

## Литература

1. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Математический сборник. 1959. Т. 47, № 3. С. 271–306.
2. Куропатенко В. Ф. О разностных методах для уравнений гидродинамики // Труды Математического института имени В. А. Стеклова АН СССР. 1966. Т. 74. С. 107–137.
3. Бондаренко Ю. А. Порядок аппроксимации, порядок численной сходимости и экономичность счета многомерной газовой динамики в переменных Эйлера на примере расчетов задачи «blast waves» // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 51–61.
4. Головизнин В. М., Зайцев М. А., Карабасов С. А., Короткин И. А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. М.: Изд-во МГУ, 2013. 472 с.
5. Бондаренко Ю. А., Софронов В. Н. Прямое одномерное газодинамическое моделирование распространения волн в периодических двухслойных средах и волновые уравнения с дисперсией // Труды XV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014.

## ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА «НИМФА» НА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ОБЪЕКТОВ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

*О. И. Бутнев, И. В. Горев, М. Н. Бардина, В. В. Горев, С. С. Колесников, А. А. Куваев<sup>1</sup>,  
О. И. Кузьмина, П. А. Машенькин, В. А. Пронин, М. Е. Семенов<sup>1</sup>, М. Л. Сидоров*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров  
<sup>1</sup>ФГУГП «Гидроспецгеология», г. Москва

Пакет программ «НИМФА» разрабатывается для моделирования фильтрации и переноса примесей подземными водами в пространстве со сложной геологической структурой. Программа ориентирована на решение задач с помощью полномасштабного комплексного моделирования на современных высокопараллельных суперЭВМ (десятки тысяч процессоров). Базовые модули

пакета «НИМФА» предусматривают возможность моделирования напорной и безнапорной нестационарной одно- и двухфазной фильтрации в анизотропной среде, а также конвективно-диффузионного массопереноса с учетом сорбции контаминантов водовмещающими породами.

Развитие пакета шло около 15 лет сначала по грантам МНТЦ, затем в рамках президентского проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий». В 2012 г. пакет получил сертификат соответствия федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, было построено несколько геофильтрационных и геомиграционных моделей (например, площадка Балтийской АЭС, Нижнекамский промышленный узел, Соль-Илецкое месторождение соли) и проведены прогнозные расчеты.

С начала 2014 г. развитие пакета осуществляется в соответствии с «Программой доработки и внедрения инновационного отечественного программного продукта «Программный комплекс «НИМФА» на период 2013–2016 годы», утвержденной генеральным директором Госкорпорации «Росатом» С. В. Кириенко. Программа предусматривает доработку пакета, его аттестацию в НТЦ ЯРБ и внедрение в качестве отраслевого стандартного программного продукта.

В рамках этой программы в 2014 г. проведен анализ, доработка, верификация и адаптация пакета «НИМФА» в части решения геофильтрационных задач.

Анализ состояния и возможностей пакета «НИМФА» проводился на базе модели, разработанной ранее в ФГУГП «Гидроспецгеология» с помощью программного комплекса «PMWIN-8». Эту модель характеризуют: отличия в коэффициентах фильтрации соседних пластов на 3–4 порядка, изменения мощностей пластов по модели примерно в 100 раз и очень сложная геометрия пластов с большим количеством окон в слабопроницаемых пластах. Средствами пакета «НИМФА», с использованием дополнительных данных мониторинга, нами была разработана уточненная модель и проведена серия кросс-верификационных расчетов по «PMWIN-8» и «НИМФА». Анализ результатов решения свидетельствует, что рассчитанное распределение напоров по модельным слоям в целом повторяет базовое решение, полученное с использованием пакета MODFLOW (разность средних значений напоров по пластам не превышает 0,25 %). Однако на отдельных участках модельной области имеются расхождения (около 5 %), обусловленные различными процедурами интерполяции геометрических характеристик модельных слоев, используемыми в пакетах «НИМФА» и MODFLOW. При этом балансовые величины модели хорошо согласуются между собой. По результатам верификации были определены направления адаптации и разработан план по доработке пакета.

Доработанный вариант пакета прошел верификацию на модели водозабора № 3 ОАО «ГНЦ «НИИАР», созданной ранее в ФГУГП «Гидроспецгеология» с помощью программного комплекса «PMWIN-8». Также была проведена серия кросс-верификационных расчетов в стационарной и нестационарной постановках.

## **ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА НИМФА-2 НА СТРУКТУРЕ ДАННЫХ ЛОГОС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

*О. И. Бутнев, И. В. Горев, Ю. Н. Дерюгин, П. А. Машенькин, С. С. Колесников,  
М. Л. Сидоров, В. А. Пронин, В. Ю. Кузнецов, А. Д. Яруллин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Для больших и сверхбольших месторождений характерны большие размеры по латерали, сложное устройство нефтеносных пластов, наличие большого количества скважин с длительными индивидуальными историями эксплуатации, сильная неравномерность протекающих процессов как по времени, так и по пространству. Как правило, для решения таких задач применяют либо проце-

дуры апскейлинга, приводящие к потере точности, либо разбиение территории на мелкие участки, что может приводить к потере информации по перетокам между ними.

В докладе представлен пакет программ НИМФА, предназначенный для численного моделирования процессов фильтрации флюидов в процессе эксплуатации нефтегазовых месторождений. Главной особенностью пакета является использование суперкомпьютерных технологий на всех основных стадиях моделирования. Архитектура пакета основана на технологии клиент-сервер с использованием «тонкого» клиента и выполнении в параллельном режиме всех стадий обработки больших объемов данных на супер

ЭВМ, начиная с этапа генерации неструктурированных сеток и заканчивая стадией обработки результатов счета. Пакет программ НИМФА позволяет проводить расчеты на сетках с количеством счетных блоков более 1 млрд. с использованием тысяч вычислительных ядер.

В пакете программ реализована модель Black Oil, позволяющая моделировать 1-, 2- и 3-фазные течения в пористой среде, процессы вытеснения нефти водой или газом, процессы разгазирования и газирования нефти. Аппроксимация дифференциальных уравнений по пространству основана на применении полностью неструктурированных сеток и конечно-объемном подходе, аппроксимация потоковых слагаемых осуществляется методом отложенной коррекции или градиентным методом. Для аппроксимации по времени применяется метод IMPES. Для моделирования трещиновато-пористых сред используется модель Каземи, которая в настоящий момент реализована для процессов двухфазной фильтрации и опирается на SS-метод.

В состав пакета входит препроцессор, позволяющий в интерактивном режиме создавать расчетные модели с учетом начальных и граничных условий, задавать параметры сетки, историю разработки, а также параметры счета.

В докладе представлены результаты расчетов процессов трехфазной фильтрации и двухфазной фильтрации в трещиновато-пористой среде с использованием миллионов счетных ячеек и вариацией количества вычислительных ядер. Продемонстрировано ускорение счета в 552 раза на 768 вычислительных ядрах.

## Литература

1. Бутнев О. И., Бардина М. Н. и др. Суперкомпьютерные технологии для нефтегазовой отрасли. Международная конференция RAO/CIS Offshore: сб. трудов. г. Санкт-Петербург, 2011. С. 499–502.

## АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ РАМЗЕС-КП ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ГИБРИДНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЭВМ

*А. Н. Быков, Д. Г. Гордеев, Н. Н. Жильникова, В. Г. Куделькин,  
Е. А. Сизов, А. А. Федоров*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Появление в последние годы гибридных ЭВМ требует учета особенностей их архитектуры в прикладных программах.

В докладе обобщен опыт перевода методики РАМЗЕС-КП [1], предназначенной для расчета многокомпонентных теплопроводных сред в эйлерово-лагранжевых координатах, на ЭВМ гибридной архитектуры. Показаны особенности методики с точки зрения распараллеливания на гибридных ЭВМ, описаны проблемы, встретившиеся при адаптации программ и способы их решения.

В ходе адаптации программ для гибридных параллельных ЭВМ было реализовано следующее:

1. Логическое связывание ускорителя с ядром центрального процессора (ЦП), чтобы каждый арифметический ускоритель (АрУ) работал только с одним ядром ЦП.
2. Обмен данными между ЦП и АрУ для программ, содержащих MPI-обмены.
3. Обработка списочных массивов, использующихся для хранения информации о смешанных ячейках (содержащих несколько веществ), была организована с помощью атомарных операций.
4. Решаемая в методике РАМЗЕС-КП система уравнений газовой динамики, замыкается уравнениями, описывающими теплофизические свойства веществ: уравнениями состояния (УРС), пробегами фотонов в веществе. Доступ к программам расчета теплофизических свойств на АрУ реализован с помощью связи РАМЗЕС-КП и специально разработанной версии автономной библиотеки УРС-ОФ [2].
5. Для реализации метода прогонки, использующегося для нахождения решения систем линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, которая возникает из-за использования неявной схемы, на нескольких АрУ, был реализован метод распараллеливания прогонки, предложенный Н. Н. Яненко [3]. Он подробно описан в [4].

В качестве тестовой была выбрана задача сжатия легкого вещества тяжелой оболочкой. Число точек составило 200 000. Эффективность распараллеливания методом умножения при задействовании 32 ускорителей составила не ниже 71 %. Также было получено, что использование АрУ позволяет уменьшить время счета задачи от 21 до 28 раз.

Таким образом, создана методика, предназначенная для счета задач на гибридных ЭВМ.

### Литература

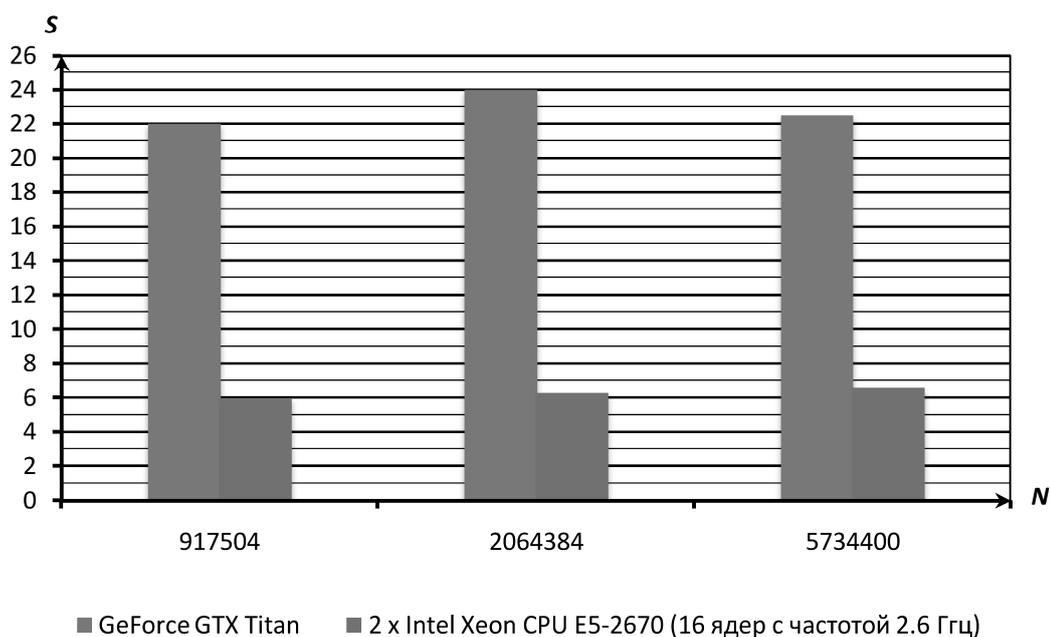
1. Быков А. Н., Веселов В. А., Воронин Б. Л., Ерофеев А. М. Методика РАМЗЕС-КП для расчета пространственных движений многокомпонентных теплопроводных сред в эйлери-лагранжевых координатах // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2008. Вып. 13. С. 50–57.
2. Быков А. Н., Гордеев Д. Г., Куделькин В. Г., Куликова М. А., Сизов Е. А., Чупраков Е. Е. Организация взаимодействия прикладных программ и библиотеки УРС-ОФ расчета теплофизических свойств веществ на ЭВМ с арифметическими ускорителями // Труды XIV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 120–128.
3. Яненко Н. Н., Коновалов А. Н., Бугров А. Н., Шустов Г. В. Об организации параллельных вычислений и «распараллеливании» прогонки // Числ. методы мех. спл. среды. 1978. Т. 9, № 7. С. 139–146.
4. Быков А. Н., Ерофеев А. М., Сизов А. Н., Федоров А. А. Метод распараллеливания прогонки на гибридных ЭВМ // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 43–47.
5. Новаев Д. А., Бартенев Ю. Г., Липов Д. И., Колпаков С. И., Киселев А. Б., Серова Т. Н., Худякова Л. В. Программные средства STK для исследования эффективности выполнения параллельных приложений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 4. С. 72–81.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА НА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ГРАФИЧЕСКИМИ УСКОРИТЕЛЯМИ

*И. В. Бычин, В. А. Галкин, Т. В. Гавриленко, А. В. Гореликов, А. В. Ряховский*

Сургутский государственный университет ХМАО – Югры, г. Сургут

Создан комплекс программ для численного моделирования трехмерных задач гидродинамики и теплообмена вязкой несжимаемой жидкости на гибридных вычислительных системах с графическими ускорителями. Разработка проводилась с использованием открытого стандарта OpenCL [1]. Комплекс позволяет решать задачи в прямоугольных и сферических координатах. Дискретные аналоги уравнений получены методом контрольного объема с применением неявной схемы и схемы со степенным законом для аппроксимации конвективных и диффузионных потоков на гранях контрольных объемов. Реализованы два алгоритма расчета поля течения: SIMPLER [2] и PISO [3]. Проведено тестирование комплекса программ на большом количестве бенчмарков. Результаты тестов демонстрируют корректность получаемых численных решений и эффективность использования гибридных вычислительных систем. При использовании вычислительной системы с графическим ускорителем GTX Titan Nvidia получено существенное ускорение (~20х) (рисунок) на достаточно «плохих» с точки зрения распараллеливания трехмерных нестационарных задачах конвекции вязкой несжимаемой жидкости [4].



Зависимость ускорения  $S$  от количества контрольных объемов  $N$

С использованием разработанного программного комплекса проведены серии вычислительных экспериментов по исследованию различных режимов естественной конвекции во вращающихся сферических слоях в зависимости от значений определяющих параметров (чисел Релея, Экмана и Прандтля). В результате вычислительных экспериментов получены периодические устойчивые конвективные структуры, представляющие интерес с точки зрения теории формирования геомагнитного поля.

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-01-12051 офи\_м.

### Литература

1. Стандарт OpenCL: сайт. – URL [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.khronos.org/ocl> (дата обращения 10.05.2014).
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Issa R. I. Solution on the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting // Journal of Computational Physics. 1985. 61. P. 40–65.
4. Christensen U. R. et al. A numerical dynamo benchmark // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2001. 128. 25–34.

## ДЕКЛАРАТИВНО-ИМПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ СЦЕН НАУЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

*П. А. Васёв<sup>1</sup>, М. О. Бахтерев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт математики и механики УрО РАН,

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

В докладе предлагается оригинальный метод описания сцен трехмерной визуализации. Главная цель и особенность метода – высокая скорость, с которой можно получать визуализацию результатов различных вычислений.

Пользователь описывает трехмерную сцену для визуализации как набор объектов. Объекты задаются своими данными (например, координатами) и свойствами отображения, такими как цвет и прозрачность.

Описание формируется на специальном языке, среди свойств которого: возможность задавать строковые значения и массивы, загружать внешние файлы и выполнять подпрограммы.

Это описание поступает на вход специальной программе, которая интерпретирует его и предоставляет различные интерфейсы для запросов к сцене. Далее запускается программа визуализации. Она посредством запросов выясняет содержание сцены и отображает его.

Такой подход позволяет варьировать язык описания сцены, программу-интерпретатор, протоколы взаимодействия, и программы визуализации.

Информация по реализации метода размещается на сайте: [view.lact.ru](http://view.lact.ru).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы», проект 12-П-1-1034.

### Литература

1. Васёв П. А. Проект среды разработки специализированных систем визуализации // Труды XII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 22–23.
2. Васёв П. А., Кумков С. С., Шмаков Е. Ю. Конструктор специализированных систем визуализации // Электронный журнал «Научная визуализация». 2012. Кв. 2. Т. 4, № 2. МИФИ. ISSN 2079-3537. С. 64–77.

## ВЫПОЛНЕНИЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДАННЫХ ДВУМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «БАЗИС»

*С. В. Гагарин, О. В. Беломестных, С. И. Кузьмина, Е. А. Приб, А. А. Ушкова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики, г. Снежинск

При математическом моделировании физических процессов механики сплошной среды, основанных на лагранжевых методиках, в процессе расчета модели разностная сетка может деформироваться настолько, что дальнейший счет становится невозможным. В этом случае расчетчик должен создать новую сетку, обычно с сохранением геометрии математических областей модели и запустить специальную программу, осуществляющую интерполяцию (пересчет) физических величин со старой разностной сетки на новую.

Для выполнения интерполяции данных двумерных расчетов в РФЯЦ-ВНИИТФ используется программа REDOS (редактирование данных основного счета). Эта программа является консольным приложением, и заданием для нее является текстовый файл. Для подготовки текстового файла с заданием расчетчик должен проанализировать данные исходного разреза (совокупность физических величин, характеризующая состояние рассчитываемой системы, на определенный момент времени), будем называть его разрезом-источником и разреза с новой разностной сеткой – разрезом-приемником. В результате такого анализа в текстовое задание вносится информация о том, какие области разреза-источника требуется пересчитать на заданные области разреза-приемника, какие вещества при этом учитывать, а также дополнительная информация, например, переименование номеров веществ.

Для анализа информации из разреза-источника и разреза-приемника в двумерной постановке в РФЯЦ-ВНИИТФ используется программа VIZI-2D. Эта программа обладает широкими возможностями по визуализации двумерных данных в графическом виде. Используя эту программу, расчетчик выводит на экран монитора изображения обоих разрезов и, ориентируясь на визуальное восприятие, формирует текстовое задание на интерполяцию. Такой подход достаточно трудоемкий, труден в восприятии, и, как следствие, возможны ошибки при формировании задания.

С 2009 года в РФЯЦ-ВНИИТФ началась работа по созданию программы, объединяющей в единой оболочке как средства графического и текстового представления двумерных данных, так и средства интерактивной подготовки задания на пересчет. В результате этой работы был создан программный комплекс (ПК) «БАЗИС», который включает следующие подсистемы:

- 1) текстового (табличного) представления данных разреза;
- 2) графического представления данных разреза;
- 3) сравнения графических изображений разрезов;
- 4) подготовки и расчета начальных данных (подсистема «GeomGrid2»);
- 5) подготовки задания на пересчет;
- 6) запуска пересчета;
- 7) расчета средних (балансовых) значений физических величин.

В докладе описывается, каким образом с использованием указанных подсистем выполняется интерактивное формирование задания на пересчет, запуск пересчета и анализ полученного результирующего разреза.

Первые три подсистемы позволяют анализировать данные двумерной задачи в текстовом и графическом виде. Подсистема «GeomGrid2» позволяет создать разрез-приемник. Подсистема подготовки задания на пересчет позволяет в интерактивном виде готовить задание на пересчет. Подсистема запуска пересчета позволяет запустить программу REDOS как на локальном компьютере, так и на удаленном вычислительном сервере. Подсистема расчета средних значений позволяет сравнить балансовые значения физических величин (массы, объемов, плотности и др.) в разрезах до и после пересчета.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В КИНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В. А. Галкин

Сургутский государственный университет, г. Сургут

## 1. Кинетический метод решения дифференциальных уравнений

На кубе

$$\Omega_n = \prod_{k=1}^n [0, 1] \subset \mathbb{R}^n$$

рассматривается система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{du}{dt} = f(u, t), \quad t > 0, \quad u \in \Omega_n, \quad (1)$$

где правая часть  $f = \{f_l\}_{l=1}^n$  такова, что во внутренних точках куба  $\Omega_n$  функции  $f_l$  являются многочленами по переменным  $u = \{u_k\}_{k=1}^n$

$$f_l(u, t) = \sum_{p \geq 0} \alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}(t) u_1^{p_1} u_2^{p_2} \dots u_n^{p_n}, \quad (2)$$

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n, \quad p_l \in \mathbb{N}, \quad u_k^0 \stackrel{\text{def}}{=} 1,$$

с локально ограниченными коэффициентами  $\alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}$  при значениях времени  $t \geq 0$ . Вне куба  $\Omega_n$  поле  $f(u, t)$  доопределим следующим образом. Положим  $f_l(u, t) = 0$  при аргументах  $u_l \leq 0$ , или  $u_l \geq 1$ . В формуле (2) при значениях  $0 < u_l < 1$  величины  $u_k$ ,  $k \neq l$ , полагаем равными 1, если  $u_k > 1$ ,  $k \neq l$ , и приравниваем 0, когда  $u_k \leq 0$ . При этих предположениях во внутренних точках куба  $\Omega_n$  решения уравнения (1) являются классическими, а при выходе их на границу  $\partial\Omega_n$  они переходят в решения А. Ф. Филиппова [1]. Задача Коши для системы (1), (2) корректна в пространстве непрерывных функций  $C_T$  ( $\forall T > 0$ ).

Сопоставим системе (1) кинетический процесс, основанный на взаимодействиях  $n$  различных видов частиц, где количество видов совпадает с размерностью системы (1). В дальнейшем множество частиц вида  $l$ ,  $1 \leq l \leq n$  будем считать подмножеством конечного множества  $D_l$  (так называемая ячейка), мощность которого положим равной натуральному числу  $N$ . Частицы размещаются среди элементов ячейки  $D_l$ . Каждой паре  $(i, l)$ , где  $i$ -номер элемента в  $D_l$ , сопоставим величину  $m_i^{(l)}(t)$ , которая равна 1, если частица вида  $l$  размещается в момент времени  $t$  в  $i$ -м элементе ячейки  $D_l$ , и  $m_i^{(l)}(t) = 0$  в противном случае. Таким образом, в каждый момент времени состояние рассматриваемой системы частиц задается распределением значений индикатор-функций  $M(t) = \{m^{(l)}(t)\}_{l=1}^n$ , где  $m^{(l)}(t) = (m_1^{(l)}(t), m_2^{(l)}(t), \dots, m_N^{(l)}(t))$ .

Пусть значения времени  $t \geq 0$  принимают дискретные значения. В каждый момент времени  $t_j$  частицы могут участвовать во взаимодействиях, приводящих к рождению и гибели частиц. Акты выбора взаимодействующих частиц разыгрываются следующим образом. Взаимодействие, приво-

дящее к рождению одной частицы вида  $l$  при участии  $p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$  частиц. Если  $p_k = 0$ , то частицы вида  $k$  не принимают участия во взаимодействии. Пусть рассматриваются значения  $p_k \geq 1$ . Для каждого такого  $k$  в ячейке  $D_k$  выберем набор различных номеров  $(i_1, \dots, i_{p_k})$ ,  $1 \leq i_s \leq N$ . Выбор осуществляется на основе независимого равновероятного розыгрыша среди всех таких наборов, находящихся в  $p_k$ -мерном кубе со стороной  $N$  во множестве  $(D_k)^{p_k}$  с вероятностью  $P_k^{(N)}$ . Если в каждом из разыгранных номеров в рассматриваемых ячейках находится частица, то разрешено взаимодействие выбранных частиц, влекущее рождение или гибель одной частицы в заданной ячейке  $D_l$  (при наличии вакансий). Обозначим  $\xi^{(l)}(t_j) \in \prod_{k=1}^n D_k$  набор номеров взаимодействующих частиц. Если заданная величина  $\alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}(t_j) > 0$ , то для  $\xi^{(l)}(t_j)$  допускается рождение одной частицы в ячейке  $D_l$ . Аналогично отрицательным значениям этой величины сопоставляется гибель одной частицы в  $D_l$ . Акты рождения и гибели для  $\xi^{(l)}(t_j)$  разыгрываем заданием независимых случайных величин  $\eta^{(l)}(t_j)$ , принимающих значение 1 с условной вероятностью  $|\alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}(t_j)| N \tau \leq 1$ , и значение 0 с дополнительной вероятностью. Для нулевых значений  $\eta^{(l)}$  взаимодействие выбранных частиц исключается.

Если для выбранного  $\xi^{(l)}(t_j)$  розыгрыш приводит к рождению частицы вида  $l$ , равновероятным образом одна частица может помещаться на свободные от частиц номера в ячейке  $D_l$ . Если свободных номеров нет, то размещение не происходит. В случае гибели частицы вида  $l$  равновероятным образом может быть удалена одна из частиц в ячейке  $D_l$ . Если частицы в  $D_l$  отсутствуют, то удаление частиц не происходит.

Вектор состояния системы частиц  $M(t_j)$  изменяется на основе алгебраической суммы последовательного розыгрыша всех процессов рождения и гибели частиц в каждой ячейке  $D_l$ , определенных заданием коэффициентов  $\alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}(t_j)$  в правой части системы (1). Тем самым определяется значение  $M(t_{j+1})$ .

После проведения перечисленных розыгрышей во всех ячейках, содержащих частицы, переходим к выборочному вероятностному пространству [1], в котором все построенные выше случайные величины, входящие в  $M(t_{j+1})$  являются независимыми без изменения их функций распределения. Таким образом, полностью определена эволюция системы для всех  $t_j \geq 0$ .

**Определение.** Преобразование  $M(t_j) \mapsto M(t_{j+1})$  на выборочном вероятностном пространстве назовем эволюцией системы.

Рассмотрим числа заполнения ячейки  $D_l$  частицами:

$$N^{(l)}(t_j) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^N \delta_{l, m_i^{(l)}}(t_j).$$

Обозначим величиной  $\langle N^{(l)}(t_j) \rangle$  среднее число частиц в ячейке  $D_l$  в момент времени  $t_j \geq 0$ .

Положим

$$u_N^{(l)}(t_j) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\langle N^{(l)}(t_j) \rangle}{N}. \quad (3)$$

**Теорема 1.** Пусть  $\alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}(t)$  являются локально ограниченными функциями при  $t \geq 0$ .

Тогда средние концентрации  $u_N^{(l)}(t_j)$  подчиняются разностному уравнению

$$u_N^{(l)}(t_{j+1}) = u_N^{(l)}(t_j) + \tau f_l(u_N^{(\bullet)}(t_j), t_j) + \tau O(N^{-1}), \quad N \geq 1,$$

где оценка  $O(N^{-1})$  является равномерной относительно  $t_j$ .

**Следствие.** Пусть выполнены условия теоремы 1 и существует  $\lim_{N \rightarrow \infty} u_N^{(l)} = (0)$ . Тогда при

каждом  $t_j \geq 0$  существует  $\lim_{N \rightarrow \infty} u_N^{(l)}(t_j) = u_l^{(l)}(t_j)$ , подчиняющийся разностному уравнению

$$u^{(l)}(t_{j+1}) = u^{(l)}(t_j) + \tau f_l(u^{(\bullet)}(t_j), t_j), \quad (4)$$

Если начальные значения в разностном уравнении (4) согласованы с начальными значениями решения системы (1), (2) так, что

$$u^{(l)}(0) = u_l(0), \quad (5)$$

то разностная схема (4), (5) сходится к единственному неотрицательному решению задачи Коши для уравнения (1) на кубе  $\Omega_n$ .

**Теорема 2.** Пусть  $\alpha_{p_1, p_2, \dots, p_n}^{(l)}(t)$  являются локально ограниченными функциями при  $t \geq 0$

и существует  $\lim_{N \rightarrow \infty} u_N^{(l)}(0) = u_l(0)$ , где  $\{u_l\}_{l=1}^n$  – решение системы (1). Тогда для последовательности средних концентраций (3) справедливо соотношение

$$\max_{0 \leq j \leq \lfloor T/\tau(N) \rfloor} |u_l(t_j) - u_N^{(l)}(t_j)| \rightarrow 0, \quad N \rightarrow \infty, \quad \forall l,$$

для каждого  $T \geq 0$ .

## 2. Модель ортогональных столкновений частиц

В кинетическом уравнении Больцмана

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{f}(dv, t) = S^{(dv)}(\bar{f}(\cdot, t)), \quad \bar{f}(dv, t) = f(v, t) dv + f_0(t) \delta_0(dv),$$

оператор столкновений  $S^{(dv)}(f)$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} S^{(dv)}(\bar{f}) = & \delta_0(dv) \left\{ \frac{1}{2} \int_{\{\mathbf{R}_n \setminus \{0\}\} \times \{\mathbf{R}_n \setminus \{0\}\}} \Phi(v, v_1) f(v) f(v_1) \delta_0(\cos(v, v_1)) dv dv_1 \right\} + \\ & + dv \left\{ \frac{1}{2} \int_{\mathbf{R}_n \setminus \{0\}} \Phi(v - v_1, v_1) f(v, t) f(v_1, t) \delta_0(\cos(v - v_1, v_1)) dv_1 - \right. \\ & \left. - \int_{\mathbf{R}_n \setminus \{0\}} \Phi(v, v_1) f(v, t) f(v_1, t) \delta_0(\cos(v, v_1)) dv_1 \right\}. \end{aligned}$$

Примером решения указанного уравнения при интенсивности столкновений  $\Phi=1$  является мера, состоящая из абсолютно непрерывной компоненты с нестационарным максвелловским распределением, и атомарной меры, эволюционирующей при  $t \rightarrow +\infty$  к мере Дирака  $\delta_0(dv)$ :

$$f(dv, t) = \frac{1}{\pi \left(1 + \frac{t}{2\pi}\right)^2} \exp\left(-\frac{v^2}{1 + \frac{t}{2\pi}}\right) dv + \frac{t}{2\pi + t} \delta_0(dv).$$

Приведенная формула описывает «перекачку» вещества из подвижной компоненты газа в неподвижную. Она является примером функционального решения задачи Коши при непрерывных начальных данных (распределение Максвелла). Очевидно, что для этого решения выполняются законы сохранения массы, средний импульс равен нулю, сохраняется средняя кинетическая энергия. Масса вещества в подвижной компоненте (совпадающая с вероятностью обнаружения частицы в подвижной компоненте) равна  $\rho(t) = \left(1 + \frac{t}{2\pi}\right)^{-1}$ ; полная масса неподвижной компоненты (вероятность обнаружения частицы в неподвижной компоненте) равна  $\frac{t}{2\pi + t}$ ; температура неподвижной компоненты равна нулю. При этом температура газа  $T^\circ(t)$  сосредоточена в подвижной компоненте и растет с течением времени пропорционально  $1 + \frac{t}{2\pi}$ . Выполняется уравнение состояния идеального газа (закон Клапейрона–Менделеева)  $P = R\rho T^\circ$ . На приведенном решении давление  $P \equiv \text{const}$ .

Для данной модели проведены расчеты на высокопроизводительной вычислительной системе АПК-5 Сургутского государственного университета методом непосредственного моделирования ортогональных столкновений частиц. Установлена сходимость результатов численного моделирования к решениями кинетического уравнения Смолуховского теории коагуляции [2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 13-01-12051.

### Литература

1. Галкин В. А. Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского. М.: Бином, 2009.
2. Галкин В. А. Уравнение Смолуховского. М.: Физматлит, 2001.

### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*В. И. Голубев<sup>1,2</sup>, И. Б. Петров<sup>1,2</sup>, Н. И. Хохлов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>НИИ системных исследований РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

В данной работе рассматривается численный сеточно-характеристический метод [1, 2] на гексаэдральных [3] и тетраэдральных [4] расчетных сетках для расчета динамических процессов в гетерогенных средах. Моделирование основано на использовании полной определяющей системы уравнений упругого тела в частных производных с явным выделением контактных границ неодно-

родностей (полостей и геологических трещин) и постановкой на них корректных математических условий. В силу высокой вычислительной сложности задачи были разработаны параллельные алгоритмы, ориентированные на многопроцессорные вычислительные системы. Эмпирическая оценка их масштабируемости подтверждает возможность расчета на сетках, содержащих сотни миллионов узлов, за приемлемое время.

В работе проведено решение класса задач по моделированию распространения сейсмических волн в неоднородных средах. Рассмотрена задача сейсмической разведки в трещиноватых средах, получен сейсмический отклик от кластера макротрещин. Также изучен процесс распространения упругого возмущения из очага землетрясения, показано влияния структуры среды на сигнал, регистрируемый на поверхности. Одной из актуальных практических задач, которая может быть решена путем компьютерного моделирования, является оценка сейсмостойкости наземных сооружений. В работе проведено моделирование воздействия различных типов волн на наземные строения (АЭС, ГЭС, жилые дома). С использованием критериев хрупкости и пластичности были получены динамические картины развития разрушений.

### Литература

1. Иванов В. Д., Кондауров В. И., Петров И. Б., Холодов А. С. Расчет динамического деформирования и разрушения упругопластических тел сеточно-характеристическими методами // Математическое моделирование. 1990. Т. 2, № 11. С. 10–29.
2. Кондауров В. И., Петров И. Б., Холодов А. С. Численное моделирование процесса внедрения жесткого тела вращения в упругопластическую преграду // ПТМФ. 1984, № 4. С. 132–139.
3. Петров И. Б., Хохлов Н. И. Моделирование сейсмических явлений сеточно-характеристическим методом // Труды МФТИ. 2011. Т. 3, № 3. С. 159–167.
4. Петров И. Б., Фаворская А. В., Санников А. В., Муратов М. В. Сеточно-характеристический метод на неструктурированных тетраэдральных сетках // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2014. Т. 54, № 5. С. 85–96.

## 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС ПРИ ПАДЕНИИ САМОЛЕТА

*В. И. Голяков, А. В. Наумкин*

ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва

Существующие отечественные и зарубежные нормы по проектированию АЭС предусматривают обязательный учет воздействия, вызванного падением самолета. Устойчивость функционирования при ударе самолета должна обеспечиваться для реакторного отделения, хранилищ свежего и отработанного топлива и ряда других объектов на территории станции. Необходимый уровень защиты достигается использованием монолитных железобетонных ограждающих конструкций.

В настоящей работе представлена методика для численного расчета напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при заданном динамическом импульсе воздействия на локальную область внешней поверхности сооружения. Конструкция рассматривается в рамках трехмерного метода конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени.

Математическая модель бетона\* [1] описывает неупругое деформирование материала при сжатии и сдвиге, в т.ч. разупрочнение, трещинообразование в зоне растяжения. Динамическое уп-

---

\*Голяков В. И., Обизюк В. А. «Математическое моделирование деформирования бетона при интенсивных динамических нагрузках»: сб. науч. тр. 26 ЦНИИ МО РФ. Вып. II/2, - М.: 26 ЦНИИ, 2006. С. 56–77.

рочнение бетона зависит от текущей скорости деформирования. Армирование конструкции может быть задано в виде дискретных стержней, произвольно расположенных в теле бетона.

Программный код выполнен на языке Фортран (ПО «Intel Visual Fortran Composer XE 2011»), с использованием технологий распараллеливания вычислений на многопроцессорных вычислительных системах в ОС LINUX 64bit и WINDOWS 64bit.

Программный комплекс позволяет производить расчет больших конечно-элементных моделей сооружений, включающих более 5 млн КЭ (Рис.1).

На рис. 1 представлен пример конечно-элементной модели здания реактора, имеющей более 2 млн КЭ. В зоне ударного воздействия самолета сетка сгущается до размера ячейки менее 10 см. Рис. 2 иллюстрирует картину трещин растяжения, возникших на внутренней стороне защитной оболочки в результате воздействия от падения самолета.

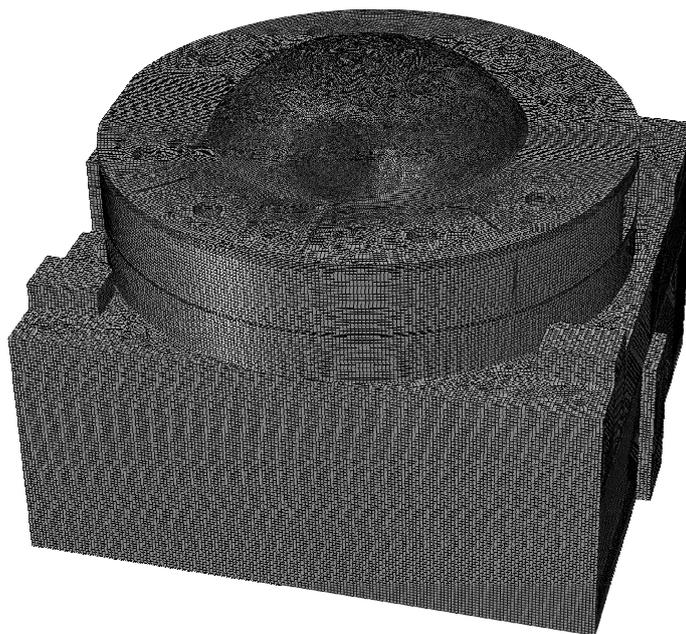


Рис. 1. Конечно-элементная модель здания реактора

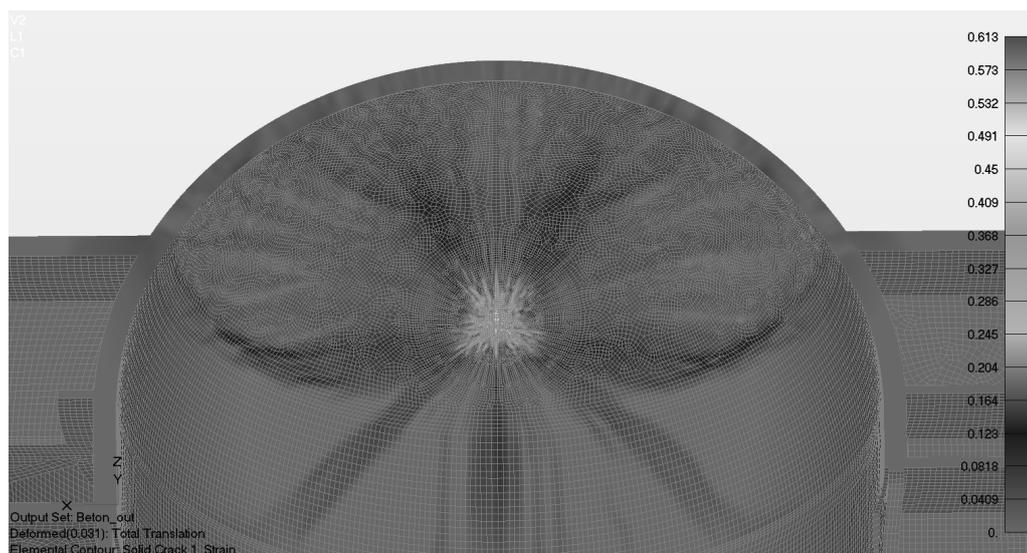


Рис. 2. Деформации трещинообразования (в %) на внутренней стороне внешней защитной оболочки при ударе самолета

## КОНЕЧНО-ОБЪЕМНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ГИБРИДНЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

*А. В. Горобец<sup>1</sup>, С. А. Суков<sup>1</sup>, Ф. Х. Триас<sup>2</sup>, П. Б. Богданов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Политехнический университет Каталонии, г. Барселона

<sup>3</sup>НИИ системных исследований РАН, г. Москва

Современные тенденции в развитии архитектур суперкомпьютеров приносят все новые сложности разработчикам параллельных алгоритмов для моделирования задач механики сплошной среды. Проблемы, помимо очевидной необходимости распараллеливания на десятки тысяч обрабатываемых устройств, включают в себя: сложность многоуровневой параллельной модели, сочетающей различные типы параллелизма; зоопарк принципиально различных вычислительных архитектур и средств разработки и, как следствие, проблемы с переносимостью; все более драматичная недостаточность пропускной способности памяти на доступную вычислительную мощность. Данная работа направлена на то, чтобы противостоять этим негативным тенденциям и разрабатывать численные алгоритмы для моделирования турбулентных течений, эффективно применимые на различных архитектурах, включая гибридные системы с массивно-параллельными ускорителями GPU AMD и NVIDIA, Intel Xeon Phi.

Рассматриваются конечно-объемные алгоритмы различных типов [1–4] для моделирования как сжимаемых, так и несжимаемых течений на структурированных и неструктурированных сетках. Численные схемы повышенного порядка аппроксимации на неструктурированных гибридных сетках включают в себя схемы с полиномиальной и квазиодномерной реконструкцией, с определением переменных в узлах и в центрах ячеек. Все рассматриваемые алгоритмы имеют высокую степень параллелизма, исходные параллельные реализации для CPU рассчитаны на использование десятков тысяч процессорных ядер. На примере данных конечно-объемных численных методов показаны особенности гетерогенной реализации, демонстрируются подходы к оптимизации вычислений и адаптации к различным архитектурам, технология разработки программного обеспечения для гетерогенных вычислений. Особенное внимание уделяется слабым местам и недостаткам ускорителей и способам борьбы с ними.

Для реализации параллельных алгоритмов используется многоуровневый подход, сочетающий различные параллельные модели. На первом уровне используется MPI для объединения узлов суперкомпьютера в рамках модели с распределенной памятью. Дальнейшее распараллеливание по вычислительным ресурсам внутри гетерогенного узла обеспечивается средствами OpenMP (только для CPU и Intel Xeon Phi), и OpenCL/CUDA для GPU. В качестве основного средства разработки переносимых реализаций для гетерогенных вычислений был выбран открытый стандарт OpenCL. Для реализации асинхронных обменов данными с одновременной передачей данных и вычислений на ускорителях применена специализированная инфраструктура – планировщик OpenCL заданий [5], упрощающая использование ресурсов гетерогенного узла.

Работа в целом носит обзорный характер: резюмируется опыт использования ускорителей различных типов для разнообразных конечно-объемных CFD алгоритмов. Представлены подробные данные о достигаемой фактической производительности, ускорении по сравнению с вычислениями на CPU, дается сравнение эффективности использования различных вычислительных устройств, анализ полученных результатов и сравнение различных средств разработки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.604.21.0092).

### Литература

1. Gorobets A., Trias F. X., Oliva A. A parallel MPI+OpenMP+OpenCL algorithm for hybrid supercomputations of incompressible flows // *Computers and Fluids*. 2013. Vol. 88. P. 764–772.
2. Абалакин И. В., Бахвалов П. А., Горобец А. В., Дубень А. П., Козубская Т. К. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // *Вычислительные методы и программирование*. 2012. Т. 13. С. 110–125.
3. Суков С. А., Горобец А. В., Богданов П. Б. Адаптация и оптимизация базовых операций газодинамического алгоритма на неструктурированных сетках для расчетов на массивно-параллельных ускорителях // *Журнал вычисл. мат. и мат. физ.* 2013. Т. 53, № 8. С. 1360–1373.
4. Oyarzun G., Borrell R., Gorobets A., Lehmkuhl O., Oliva A. Direct Numerical Simulation of Incompressible Flows on Unstructured Meshes Using Hybrid CPU/GPU Supercomputers // *Proc. Engineering*, 25-th PCFD. 2013. Vol. 61. P. 87–93. 1.
5. Bogdanov P. B., Efremov A. A. Programming infrastructure of heterogeneous computing based on OpenCL and its applications // *GPU Technology Conference GTC-2013*, March 18–21, San Jose, California, USA.

### ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ПРОНИКАНИЕ СТЕРЖНЕВОГО УДАРНИКА В ГРАНИТ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО МЕТОДИКАМ ЭГАК И ТИМ

*А. В. Городничев, В. В. Залесский, А. Г. Иоилев, С. А. Капинос, Ю. В. Кочнев,  
А. А. Краюхин, Н. В. Лапичев, В. Н. Мотлохов, О. Н. Пронина, И. В. Рыжов,  
А. В. Сальников, С. С. Соколов, Т. И. Чайка, Ю. В. Янилкин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Численное моделирование занимает важное место при изучении явлений высокоскоростного удара и взрыва в скальном грунте. Это необходимо для прогнозирования механического действия промышленных взрывов, исследования кратерообразования при падении крупных метеоритов и т. д. Для получения достоверных результатов расчетов необходимо применять достоверные физические модели изучаемых сред и проводить их всестороннюю верификацию и валидацию в используемых численных методиках. В литературе представлено небольшое количество моделей скальных грунтов, которые с успехом используются для моделирования задач как взрыва, так и удара. В первую очередь это связано с многообразием и сложностью процессов, происходящих при динамическом нагружении скального грунта, а также большим разбросом его механических характеристик. Из зарубежных моделей можно отметить модель разрушения скального грунта [1] разработанную в LLNL, с помощью которой авторы успешно описывали в расчетах как камуфлетные ядерные взрывы, так и лабораторные эксперименты в граните, а также использовали эту модель для численного решения задач проникания в скальный грунт [2]. Из отечественных моделей, на наш взгляд, наибольший интерес представляет собой обобщенная квазиупругопластическая (ОКУП) модель деформирования и разрушения скального грунта [3]. Эта модель была разработана и широко использовалась в ЦФТИ МО РФ для моделирования механического действия взрыва на скальный грунт [4]. В 2008 году нами была предложена модифицированная версия ОКУП модели, описанная в работе [5]: при вычислении среднего размера фрагмента при сдвиговом разрушении вместо эмпирической формулы для взрывов используется модель хрупкого разрушения Грейди [6]. Это позволило расширить класс решаемых с помощью ОКУП модели задач и проводить расчеты как взрыва, так и удара и проникания.

Модифицированная версия ОКУП модели введена в методику ЭГАК [7], предназначенную для проведения расчетов на регулярной эйлеровой сетке, и в методику ТИМ [8], предназначенную для проведения расчетов на нерегулярной лагранжевой сетке. В докладе приведены результаты валидационного эксперимента по высокоскоростному прониканию стержневого металлического ударника в гранитную мишень и проведенных по методикам ЭГАК и ТИМ валидационных расчетов.

В опыте по прониканию стержневого ударника из ВНЖ с хвостовой стабилизирующей юбкой из дюралюминия массой 8 г в мишень из гранита при практически нормальном ударе со скоростью 3,27 км/с проведено рентгенографирование преграды и ударника в процессе проникания. По рентгенограмме определены длина остатка стержня и профиль каверны.

Численное моделирование опыта проводилось в двумерной осесимметричной постановке. Расчеты по методике ТИМ проводились на лагранжевой многоугольной неструктурированной счетной сетке, расчеты по методике ЭГАК - на эйлеровой равномерной квадратной счетной сетке. Проведено исследование на сходимость по подробности счетной сетки. Получено хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальным данным.

### Литературы

1. Simulation of an underground explosion in granite: Preprint / LLNL; Antoun T. H., Vorobiev O. Y., Lomov I. N., Glenn L. A.; UCRL-JC-134523 Rev.1. Livermore, 1999. [Electronic resource]. Mode of Access: <http://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235748.pdf>.

2. Antoun T. H., Lomov I. N., Glenn L. A. Simulation of the penetration of a sequence of bombs into granitic rock // *Int. J. Impact Engng.*, 2003. Vol. 29. P. 81–94.

3. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.

4. Физика ядерного взрыва. Том 1. Развитие взрыва / под ред. В.М. Лоборева. М.: Изд-во ЦФТИ МО РФ, 2000.

5. Городничев А. В., Краюхин А. А., Иоилев А. Г., Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Линяев С. А., Пронина О. Н., Разумков А. С. Численное моделирование высокоскоростного удара и взрыва в скальном грунте в методике ЭГАК // *Труды XIV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование»* / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 203–208.

6. Grady D.E. The spall strength of condensed matter // *J. Mech. Phys. Solids*, 1988. Vol. 36. P. 353–384.

7. Янилкин Ю. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физических процессов*. 2003. Вып. 1. С. 20–28.

8. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Панов А. И., Соболев И. В., Пушкарев А. А. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физических процессов*. 2006. Вып. 4. С. 29–44.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ ВЗРЫВЕ ПЛАСТИНЫ ВВ ПО МЕТОДИКАМ ЭГАК И ТИМ

*А. В. Городничев, А. Г. Иошлев, А. А. Краюхин, В. Н. Мотлохов, О. Н. Пронина,  
С. С. Соколов, Т. И. Чайка, Ю. В. Янилкин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Важное место при изучении взрывных явлений занимает численное моделирование. Оно необходимо для прогнозирования механического действия промышленных взрывов, расчета развития воронки или каверны и распространения ударной и сейсмической волн. К мягким грунтам относят сильнотрещиноватые слабые породы с коэффициентом крепости до 1 как естественного сложения, так и насыпные: песок, глина, суглинок, аллювий, мергель и т. п., а также гравий и щебень.

Сложность расчета распространения волн в мягком грунте связана с большой неопределенностью параметров среды, что вызывает необходимость применения сложных математических моделей динамического деформирования с большим количеством параметров. В качестве такой модели в настоящей работе выбрана упругопластическая релаксационная модель динамического деформирования мягкого грунта [1]. Подбор параметров модели обычно осуществляется по результатам измерений физических величин, характеризующих взрывную волну, в опытах, проведенных в лабораторных и полевых условиях, путем расчета соответствующих одномерных задач, аналогичных по постановке экспериментам [1].

Упругопластическая релаксационная модель [1] удовлетворяет основным требованиям к реологическому уравнению для мягких грунтов:

- запаздывание деформаций в развитии по отношению к изменению напряжений;
- существование предельной динамической и статической диаграмм нагружения;
- увеличение мгновенного модуля нагрузки на траектории деформирования с ростом скорости деформирования;
- объемная деформация складывается из обратимой и необратимой, необратимая объемная деформация зависит как от уровня нагрузки, так и от времени ее действия;
- модуль разгрузки существенно больше динамического модуля сжатия, ниже статической диаграммы не зависит от скорости деформирования и соответствует скорости распространения звука;
- предел текучести зависит от давления.

Скорость изменения необратимой объемной деформации имеет сложную структуру, определяющуюся закономерностями взаимодействия свободного порохового пространства и жидкости друг с другом и скелетом грунта.

Соотношения между характеристиками процесса динамического деформирования представляют собой нелинейную дифференциальную связь между давлением и объемной деформацией, применимую для широкого круга мягких грунтов (песок, супесь, суглинок, глина и т. д.), характеризующихся гранулометрическим составом, а значит размером пор и зерен, начальной плотностью и влажностью, упругими модулями. Траектория нагружения и разгрузки описывается разными соотношениями, что приводит к остаточным необратимым объемным деформациям уплотнения.

При описании деформации сдвига в рамках этой модели используется линейная упругопластическая модель с функцией предела текучести от давления.

Упругопластическая релаксационная модель динамического деформирования мягкого грунта в 2003 году была введена нами в методику ЭГАК [2], предназначенную для проведения расчетов на эйлеровой сетке, и методику ТИМ [3], предназначенную для проведения расчетов на нерегулярной лагранжевой сетке.

В данной работе проведено тестирование методик ЭГАК и ТИМ на двумерной задаче о распространении взрывной волны и образовании взрывной полости в песке при взрыве расположенной

внутри массива грунта тонкой пластины химического ВВ [5]. Для описания песка в расчетах использовалась релаксационная упругопластическая модель деформирования мягкого грунта. Для описания процесса взрывчатого превращения ВВ в ПВ и дальнейшего поведения ПВ использовалась УРС Зубарева [4]. Получено хорошее согласие результатов этих расчетов с экспериментальными данными [5] и между собой.

### Литература

1. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.
2. Янилкин Ю. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физических процессов, 2003. Вып. 1. С. 20–28.
3. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Панов А. И., Соболев И. В., Пушкарев А. А. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физических процессов, 2006. Вып. 4. С. 29–44.
4. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // ФГВ. 1984, № 6. С. 114–119.
5. Гердюков Н. Н., Иоилев А. Г., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М., Новиков С. А. Исследование сжимаемости песчаного грунта при ударно-волновом нагружении // ПМТФ. 1993, № 4. С. 55–58.

## РАСЧЕТ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МЕТОДИКЕ МРС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ НЬЮТОНА

*Ю. Н. Дерюгин, С. Н. Полищук, Б. П. Тихомиров*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Одним из эффективных методов решения систем нелинейных уравнений является метод Ньютона. При достаточно хорошем начальном приближении метод сходится и вблизи решения обладает квадратичной сходимостью [1].

В 1982 году в работе [2] была предложена модификация метода Ньютона, в которой линейная система решается приближенно по итерационной схеме. Число линейных итераций было значительно уменьшено, при этом скорость сходимости метода Ньютона сохранилась. Новый метод был назван неточным методом Ньютона. В нем для контроля точности решения линейной системы были введены управляющие параметры, в качестве которых была взята константа относительной точности. Два варианта выбора управляющих параметров были предложены и обоснованы Айзенстатом и Уокером в работе [3].

Неточные методы Ньютона вошли в вычислительную практику, в частности, они используются для решения нелинейных уравнений в пакете решателей SUNDIALS (солнечные часы), разработанным в центре прикладных научных вычислений Ливерморской национальной лаборатории [4].

В настоящей работе кратко формулируется метод Ньютона, описывается класс неточных методов, разностное уравнение теплопроводности записывается в Т-форме и дельта – форме. Эффективность неточных методов проверяется на примере двух тестовых многослойных задач в рамках методики МРС, предназначенной для решения двумерных и трехмерных задач газодинамики с теп-

лопроводностью. Газодинамика рассчитывается по явной разностной схеме, теплопроводность – по неявной.

Показано, что один из рассмотренных методов позволяет существенно уменьшить объем вычислений при решении линейных систем (число внутренних итераций) с сохранением квадратичной сходимости итераций по нелинейности. Результаты, полученные при записи разностного уравнения в Т-форме и дельта-форме, сравниваются по затратам компьютерного времени. Отмечается, что расчет в дельта-форме на рассматриваемых тестовых задачах газодинамики с теплопроводностью примерно на 10% выполняется быстрее.

### Литература

1. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: Наука, 1987.
2. Dembo R. S., Eisenstat S. C., Steihaug T. Inexact Newton methods // SIAM J. Numer. Anal. 1982. Vol. 19. P. 400-408.
3. Eisenstat S. C., Walker H. F. Choosing the forcing terms an inexact Newton method // SIAM J. SCI. Comput. January 1996. Vol. 17, N 1. P. 16-32.
- 4 Woodward C. S. SUNDIALS: Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers // Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-PRESS-213978.

### ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА СЕТКАХ ТИПА «ХИМЕРА» В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

*Ю. Н. Дерюгин, Р. Н. Жучков, Д. К. Зеленский, А. В. Саразов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработан пакет программ ЛОГОС, предназначенный для решения связанных и сопряженных трехмерных задач тепломассопереноса и гидродинамики на параллельных ЭВМ. В настоящее время ведется развитие и расширение функциональных возможностей пакета программ. Доклад посвящен опыту использования перекрывающихся сеток в модуле сжимаемых течений пакета программ ЛОГОС.

Среди множества вопросов газовой динамики следует выделить класс задач, численное моделирование которых сопряжено с движением отдельных узлов и агрегатов. Это может быть относительное движение объектов, так и изменение формы исследуемого тела. Любое из движений может коренным образом повлиять на характер течения потока.

Для решения задач с подвижными границами могут применяться различные методики, например подходы на основе адаптивных или деформирующихся сеток с сохранением топологии связей. Упомянутым техникам счета присущи недостатки, связанные с высокими вычислительными затратами для подхода на адаптивных сетках и ограничения на перемещения, накладываемые на подход с деформирующимися сетками. Другой альтернативой является использование методики перекрывающихся сеток, так называемая технология счета на сетках типа «Химера». Данный прием сочетает высокую скорость счета для моделирования сложных процессов с движением границ и позволяет получать высокую точность результатов.

Для задач со сложной геометрией не всегда удается построить качественную расчетную сетку, учитывающую режимы течения и геометрические особенности всех элементов. Технология

на основе сеток типа «Химера» предполагает генерацию независимых геометрических моделей для различных объектов, которые в дальнейшем объединяются в одну сетку с перекрытиями. Такой тип сеток получил название «Химера». Вычислительный процесс на сетках типа «Химера» учитывает наличие перекрытий и обеспечивает взаимодействие топологически несвязанных сеток.

В докладе представлено описание ключевых этапов методики расчета на сетках типа «Химера». Описываются методические аспекты, алгоритмы маркировки ячеек, построение шаблона взаимодействия топологически несвязанных регионов для произвольных нерегулярных трехмерных расчетных сеток. В качестве иллюстрации работоспособности внедренных алгоритмов предлагается международный тест AGARD23 – моделирование процесса отделения подвесного груза от крыла ЛА.

## **ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ И ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

*Д. Ю. Дьянов, А. В. Казанцев, С. В. Морозов, С. В. Стародубов,  
К. В. Циберев, А. А. Челаков*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах\*. Одной из составных частей данного пакета программ является модуль решения задач по расчету напряженно-деформированного состояния конструкций при динамических термосиловых воздействиях, основанный на методе конечных элементов. В данном модуле пакета программ ЛОГОС реализована технология проведения расчетов деформирования конструкций, представленных подобластями из структурных конечных элементов (объемных элементов сплошной среды и оболочечных конечных элементов) и SPH-частиц с возможностью расчета контактного взаимодействия между ними. Эта технология обеспечивает возможность проведения расчетов динамического деформирования конструкций, в которых присутствуют области больших деформаций и разрушения, сопровождающихся разлетом вещества. В докладе представлено описание базовых процедур и алгоритмов реализованного метода; представлены результаты тестовых расчетов; проведено сравнение результатов с эталонными решениями.

---

\*Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю. В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.

## РЕАЛИЗАЦИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ МГД УРАВНЕНИЙ В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ СЖИМАЕМЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

*М. Ю. Егужова, В. А. Жмайло, В. Н. Софронов, О. Н. Чернышова,  
Ю. В. Янилкин, С. И. Глазырин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Дано описание методов расчета многокомпонентных МГД течений в 3D эйлеровой методике ЭГАК [1], в которой проблема контактных границ и расчета термодинамических параметров в смешанных ячейках решается с применением метода концентраций [2]. Данный подход естественным образом распространен и на МГД течения. При построении разностных схем учитывалось выполнение двух условий - возможность приведения разностных уравнений к консервативной форме и сохранение нулевой дивергенции магнитного поля в разностном решении. Разностные схемы получены с использованием согласованных разностных аппроксимаций дифференциальных операторов первого порядка [3].

Для решения системы разностных диффузионных уравнений неидеальной МГД использовалась библиотека параллельных решателей LPARSOL [4]. Выполнена работа по выбору оптимальных для данных систем алгебраических уравнений комбинаций решателя и предобусловливателя.

Проведено исследование точности эйлеровых методов решения уравнений идеальной и неидеальной (с учетом диффузии и эффектов Холла) магнитной гидродинамики. В качестве тестов для идеальной МГД выбраны:

- задача Римана (тест Brio – Wu [5]),
- задача о быстром вращении плоского газового диска в неподвижной среде с однородным магнитным полем [6],
- задача о влиянии однородного магнитного поля на эволюцию малых 2D возмущений границы раздела веществ в поле тяжести [7].

Для тестирования разностных методов неидеальной МГД использовались задачи с аналитическим решением. Рассматривалась плоская диффузионная волна с преобладанием эффекта Холла и двумерная осесимметричная задача диффузии магнитного поля внутрь сферического облака плазмы [8].

Показано, что в расчетах с большими градиентами проводимости погрешности, определяемые несохранением нулевой дивергенции, могут приводить к катастрофической потере точности.

### Литература

1. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Бондаренко Ю. А. и др. Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды // Труды РЯЦ-ВНИИЭФ. 2008. Вып. 12. С. 54–65.
2. Бахрах С. М., Глаголева Ю. П., Самигулин М. С., Фролов В. Д., Яненко Н. Н., Янилкин Ю. В. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // ДАН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 566–569.
3. Самарский А. А., Тишкин В. Ф., Фаворский А. П., Шашков М. Ю. Операторные разностные схемы // Дифференциальные уравнения. 1981. Т. XVII, № 7.

4. Бартенев Ю. Г., Бондаренко Ю. А., Ерзунов В. А. и др. Комплекс LPARSOL для решения СЛАУ // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 34–36.
5. Brio M., Wu C. C. An upwind differencing scheme for the equations of ideal magneto hydrodynamics // Journal of Computational Physics. 1988. Vol. 75. P. 400–422.
6. Balsara D. S., Spicer D. S. A staggered mesh algorithm using high Godunov fluxes to ensure solenoidal magnetic fields in magneto hydrodynamics simulations // Journal of Computational Physics. 1999. Vol. 149. P. 270–292.
7. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford: Oxford University Press. 1961.
8. Жмайло В. А., Кокоулин М. Е. Эффект Холла в задаче о разлете облака плазмы в магнитном поле // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2004. Вып. 1–2. С. 3–12.

## ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*Ф. С. Зайцев<sup>1,2</sup>, Ф. А. Аникеев<sup>1,2</sup>, П. Б. Богданов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>НИИ системных исследований РАН, г. Москва

Один из перспективных способов генерации энергии основан на использовании управляемых термоядерных реакций. Международным сообществом с участием России строится прототип термоядерной электростанции ITER.

Важной задачей управляемого термоядерного синтеза является изучение поведения частиц высоких энергий, так как именно такие частицы определяют энергобаланс плазмы и эффективность генерации энергии [1]. В частности, с быстрыми частицами связаны: процесс термоядерного синтеза, нагрев плазмы, тепловые и радиационные нагрузки на элементы конструкции.

Из общей модели молекулярной динамики заряженных частиц в полностью ионизированной плазме путем перехода к описанию каждого сорта частиц с помощью функции распределения строится кинетическая модель, состоящая из системы уравнений в частных производных с оператором Кулоновских столкновений Ландау. Каждому сорту частиц соответствует одно уравнение. В кинетической модели функция распределения зависит от времени и шести фазовых переменных: трех геометрических и трех скоростных (см., например, [1]). Кинетическое уравнение является шести-мерным, т. к. в него входят производные по всем шести фазовым переменным. Оператор Кулоновских столкновений – трехмерным, т.к. действует только в пространстве скоростей.

В последние годы для решения многомерных задач механики сплошной среды широкое распространение получает метод SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). Достаточно полные обзоры метода с развернутым анализом различных аспектов алгоритма представлены, например, в [2, 3]. Метод SPH имеет ряд преимуществ перед традиционными сеточными методами и методами Монте-Карло. Кроме того, SPH, позволяя в рамках единой дискретной модели охватить большое количество явлений, открывает новые возможности для полноценного самосогласованного описания динамики сложных систем.

В докладе будут представлены высокоскоростные алгоритмы решения многомерных кинетических уравнений методом SPH. Оценены время вычислений, ускорение и эффективность алгоритмов на системах с поддержкой программных моделей MPI, OpenCL и CUDA. Показано, что перспективные гибридные высокопроизводительные вычислительные комплексы НИИСИ РАН и су-

перЭВМ нового поколения позволяют перейти к решению принципиально новых актуальных теоретических и прикладных задач динамики плазмы.

Авторы признательны академику В. Б. Бетелину и А. Г. Кушниренко за поддержку исследований и обсуждение полученных результатов.

### Литература

1. Зайцев Ф. С. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е издание. М: МАКС Пресс, 2011. 640 с.
2. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 1703–1759.
3. Liu M. B., Liu G. R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments // Arch. Comput. Methods. Eng. 2010. Vol. 17. P. 25–76.

## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРАНИЦЕЙ ТОРОИДАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ЭПСИЛОН-СЕТЕЙ

*Ф. С. Зайцев<sup>1,2</sup>, Е. П. Сучков<sup>1,2</sup>, П. Б. Богданов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>НИИ системных исследований РАН, г. Москва

Ведущие страны мира предполагают переход к термоядерной энергетике, основанной на безопасном, практически неисчерпаемом источнике энергии. С участием России строится международный термоядерный реактор-токамак ITER. В Японии международное сообщество планирует сооружение первой термоядерной электростанции DEMO. В России реализуются национальные проекты Т-15 и Игнитор.

Центральной проблемой, определяющей сроки перехода к термоядерной энергетике, является проблема управления плазмой в реальном времени с обратной связью на основе развитых теоретических представлений.

Наибольшую значимость имеют задачи управления формой и положением границы плазмы и управления динамикой внутренних параметров плазмы. Однако используемые в реальных системах методы управления остаются недостаточно развитыми из-за необходимости применения комплексных математических моделей, решения сложных некорректных обратных задач диагностики плазмы, разработки объемного наукоемкого программного обеспечения и применения высокопроизводительной вычислительной техники.

Математические модели плазмы разного уровня детализации, обратные задачи диагностики плазмы, реализующие их численные методы и программное обеспечение систематически, представлены в книге [1]. Там же математически точно сформулированы основные задачи управления и приведены некоторые методы и результаты их исследования. В статье [2] подробно рассмотрен пример модели автоматического управления полным током плазмы.

Появившиеся относительно недавно вычислительная техника и алгоритмы, позволяют перейти к управлению плазмой в реальном времени на основе решения с заданной точностью комплексных обратных диагностических задач.

Доклад посвящен обсуждению высокоскоростных алгоритмов управления границей тороидальной плазмы, основанных на методе эpsilon-сетей. Рассмотрены CPU и GPU-архитектуры ЭВМ. Оценены время вычислений, ускорение и эффективность алгоритмов на системах с поддерж-

кой программных моделей MPI, OpenCL и CUDA. Показано, что гибридные высокопроизводительные вычислительные комплексы НИИСИ РАН с программной инфраструктурой гетерогенных вычислений на базе стандарта OpenCL позволяют управлять границей плазмы с обратной связью в реальном масштабе времени.

Авторы признательны академику В. Б. Бетелину и А. Г. Кушниренко за поддержку исследований и обсуждение полученных результатов.

### Литература

1. Зайцев Ф. С. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е издание. М.: МАКС Пресс, 2011. 640 с.

2. Костомаров Д. П., Зайцев Ф. С., Шишкин А. Г., Анискин Ф. А., Донцов Е. В. Управление тороидальным током в задаче эволюции равновесия плазмы // Мат. моделирование. 2013. Т. 25, № 11. С. 33–43.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЧЕТАНИЯ ПОДВИЖНЫХ И НЕПОДВИЖНЫХ СЕТОК ПРИ РЕШЕНИИ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МЕТОДИКЕ РАМЗЕС-КП

*Д. В. Зубанов, А. Н. Быков, Б. Л. Воронин, А. М. Ерофеев*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Сочетание подвижных и неподвижных сеток в рамках численного решения одной задачи имеет свою историю, начиная с классической работы 1967 года В. Ноха. Наиболее популярным на практике такой подход оказался в совместном расчете задач взаимодействия жидкости и твердого деформируемого тела (FSI – Fluid-Structure Interaction). Развиваются различные способы расчета такого взаимодействия. По способу взаимодействия тела и жидкости их можно разбить на два класса – с явным выделением границы взаимодействия (контактной границы) и без явного выделения границы взаимодействия (с отслеживанием движения контактной границы по неподвижной сетке).

В докладе представлена авторская версия такого подхода, разрабатываемого в рамках методики РАМЗЕС-КП для расчета двумерных задач газовой динамики и теплопроводности, которая предназначена для расчета пространственных движений многокомпонентных теплопроводных сред в эйлерово-лагранжевых координатах на параллельных вычислительных системах с распределенной памятью.

Привлекательной чертой сочетания подвижных и неподвижных сеток является возможность отказа от расчета некоторых областей на подвижных сетках в пользу расчета их на неподвижных сетках в процессе счета, вплоть до перевода расчета всей задачи на неподвижную сетку. В докладе описана технология поэтапного отказа от счета областей на подвижных сетках в пользу счета на неподвижных расчетных сетках.

Основной трудностью при реализации подобного подхода является организация учета взаимного влияния процессов, протекающих на двух сетках (подвижных и неподвижных). Использование параллельного режима расчетов сильно усложняет реализацию программы взаимодействия сеток, поэтому в докладе уделено большее внимание описанию алгоритмов взаимодействия сеток и проблемам их распараллеливания.

Работоспособность и эффективность разработанной методики демонстрируется на тестовых расчетах. Результаты расчетов приводятся в сравнении с аналитическими решениями и численными решениями, полученными по традиционной для методики РАМЗЕС-КП технологии расчетов.

## О ДАВЛЕНИИ В УДАРНОМ СЛОЕ ОКОЛО V-ОБРАЗНЫХ КРЫЛЬЕВ ПРИ СУЩЕСТВОВАНИИ НЕВЯЗКИХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

*М. А. Зубин<sup>1</sup>, Ф. А. Максимов<sup>1,2</sup>, Н. А. Остапенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва

В результате параметрического анализа структуры обтекания V-образных крыльев при числах Маха  $M = 6$  и  $10$  установлено, что при возникновении в ударном слое вихревых особенностей Ферри уровень давления в окрестности центральной хорды крыла в несколько раз превышает уровень давления за головной ударной волной.

V-образные крылья (рис. 1,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\vartheta$  – углы раскрытия, при вершине консоли крыла, атаки и скольжения) относятся к одной из перспективных форм летательного аппарата (ЛА), имеющего высокое аэродинамическое качество при сверхзвуковых скоростях полета [1]. Изучение структуры течения в ударном слое около таких крыльев имеет как фундаментальный, так и практический интерес. Знание характерных типов и свойств реального течения, содержащего неоднородности, и причин, их порождающих, необходимо при выборе режимов полета и проектировании расположения воздухозаборника двигателя ЛА, в основу которого положен несущий фюзеляж с нижней поверхностью в форме V-образного крыла. Анализ свойств течения около V-образных крыльев различной геометрии с присоединенными ударными волнами на передних кромках в рамках модели идеального газа проведен с использованием вычислительных кодов [2]. Использован метод установления на специальных сетках. Краевые условия учитывают свойства потока в окрестности передних кромок.

В [2, 3] было установлено, что структура течения в плоскости симметрии течения около V-образных крыльев, при реализации маховской конфигурации ударных волн, с увеличением угла атаки претерпевает скачкообразное изменение. В дополнение к одной особенности Ферри узлового типа, расположенной в точке излома поперечного контура крыла, в плоскости симметрии течения возникают еще две критические точки: растекания и стекания (вторая особенность Ферри), расположенная ближе к мостообразному скачку уплотнения маховской системы ударных волн. Последняя точка может быть как узлового, так и седлового типа. Во втором случае в вершинах контактных разрывов, выходящих из критической точки по обе стороны плоскости симметрии, располагаются вихревые структуры невязкого происхождения (особенности Ферри).

В качестве примера на рис. 2 представлены данные об обтекании крыла с  $\beta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$  при числе  $M = 10$ .

Наблюдаемые в окрестности плоскости симметрии течения вихревые особенности Ферри зарождаются при  $\alpha \approx 7,5^\circ$ . Верхняя критическая точка в обоих представленных случаях расположена от мостообразного скачка уплотнения маховской конфигурации ударных волн менее, чем в 10 % толщины ударного слоя, что должно приводить к существенно неравномерному распределению давления во внутренней области возмущенного течения.

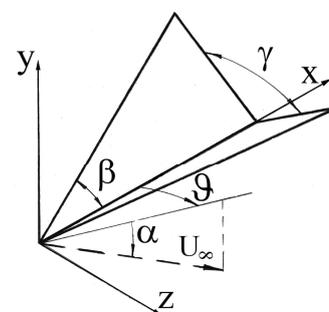


Рис. 1

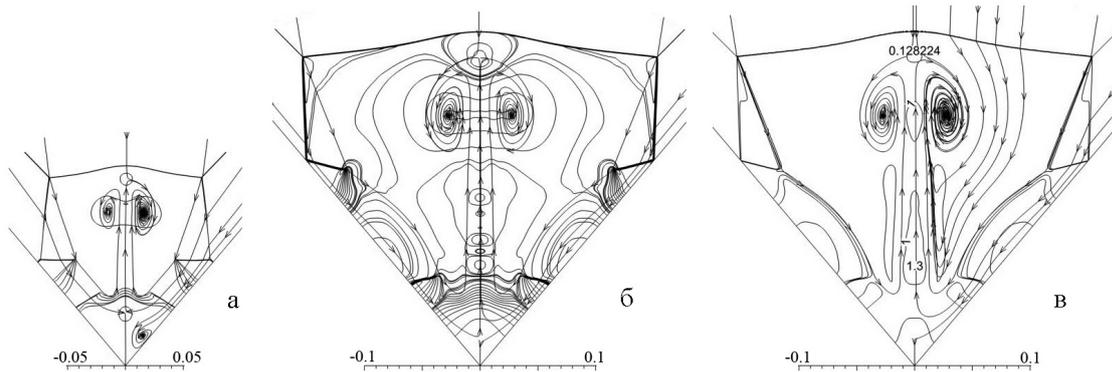


Рис. а –  $2\alpha = 20^\circ$ , б –  $2\alpha = 35^\circ$  (изобары), в – изомахи и линии тока

На рис. 2,в обращают внимание вытянутые области по обе стороны от плоскости симметрии с малыми скоростями течения на сфере, в которых некоторое множество линий тока, прошедших мостообразный скачок уплотнения головной ударной волны, резко изменяет направление течения и увлекается в сторону вихревых особенностей Ферри. Существуют замкнутые области сверхзвукового течения на сфере.

На рис. 3 представлено распределение давления вдоль оси симметрии течения при  $\alpha = 35^\circ$ . Наблюдается существенно неравномерно изменение давления на отрезке от ударной волны (скачок давления при  $Y \approx 0,3$ ) к центральной хорде крыла ( $Y = 0$ ), где течение на сфере дважды меняет направление в критических точках, нанесенных на кривую  $P(Y)$  символом 1. Обращает на себя внимание высокий уровень давления в критической точке, расположенной в окрестности точки излома поперечного сечения крыла, более чем в 2,5 раза превышающий уровень давления за мостообразным скачком уплотнения. Две последовательные пары символов 2 указывают два интервала, на которых, в соответствии с рис. 2,в, скорость течения на сфере сверхзвуковая. Символом 3 показаны координаты, отвечающие положению ударной волны на эквивалентном клине (клин с углом, равным  $\alpha$ ) и давлению за ударной волной.

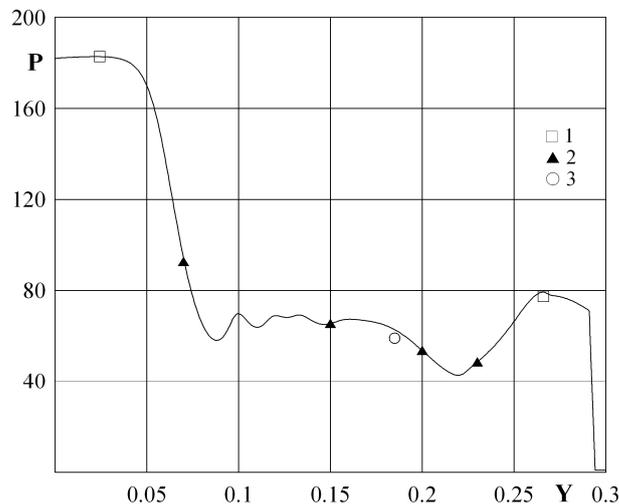


Рис. 3

На рис. 4 приведены данные о давлении в точках растекания (символ 1) в зависимости от угла атаки для крыльев с  $\beta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$  (сплошные линии) и  $\beta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$  (штриховые линии), а также за мостообразным скачком уплотнения маховской конфигурации ударных волн (символ 2) при числах  $M = 6$ -а и  $10$ -б. Эти зависимости позволяют сделать вывод, что, как с появлением в ударном слое вихревых структур, уровень  $P$  в точке растекания с ростом угла атаки начинает заметно пре-

восходить его уровень за мостообразным скачком уплотнения, а последний – уровень давления на эквивалентном клине. Указанный эффект все более проявляется при увеличении числа Маха и уменьшении угла раскрытия крыла. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00343). Расчеты проводились на МВС-100К МСЦ РАН.

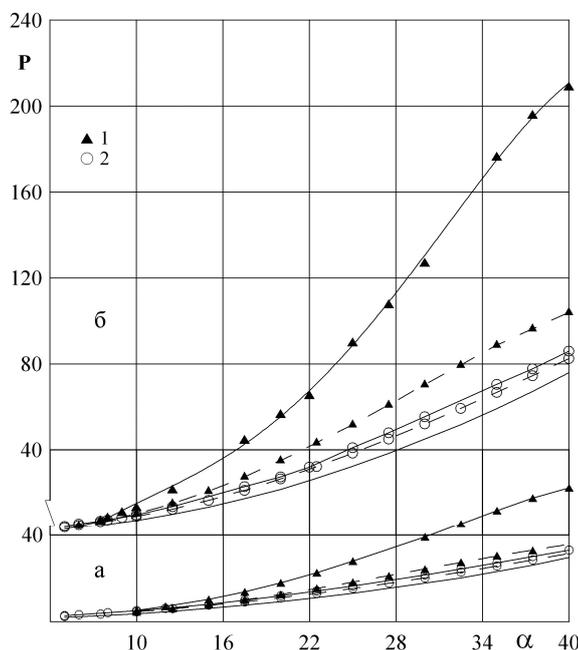


Рис. 4

### Список литературы

1. Остапенко Н. А. К вопросу об оптимальной форме волнолетов, построенных на плоских ударных волнах // Изв. РАН. МЖГ. 2000, № 6. С. 46–63.
2. Зубин М. А., Максимов Ф. А., Остапенко Н. А. Моделирование обтекания V-образных крыльев со сверхзвуковыми кромками // Труды XIV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 301–310.
3. Зубин М. А., Максимов Ф. А., Остапенко Н. А. Критерии существования невязких вихревых структур в ударных слоях конических течений газа // Доклады РАН. 2014. Т. 454, № 3. С. 282–288.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТРЕХМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВЯЗКОУПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Л. А. Игумнов, А. А. Ипатов, Е. А. Лебедева*

НИИ механики ННГУ, г. Нижний Новгород

Рассматриваются краевые задачи линейной трехмерной динамической теории вязкоупругости. Граница тела может быть достаточно произвольного вида и описываться поверхностью кусоч-

но-ляпуновского типа. Применяется интегральное преобразование Лапласа по времени [1]. Рассматриваются классические вязкоупругие модели Максвелла, Кельвина-Фойгта, стандартного вязкоупругого тела, а также модель со слабосингулярным ядром Абеля [2]. На примере численных и аналитических исследований фундаментальных и сингулярных решений показано, что всегда можно подобрать параметры модели так, что результат описания вязкоупругого отклика практически будет один и тот же. На примере решения одномерной пороупругой задачи показано, что отклики перемещений на определенном временном участке могут быть аппроксимированы с использованием вязкоупругой модели. В качестве метода решения трехмерных краевых задач развивается метод ГИУ [3]. Численная схема основана на использовании формулы Грина-Бетти-Сомильяны. Гранично-элементные схемы созданы на основе согласованной аппроксимации граничных функций (при биквадратичной аппроксимации границы) и шагового метода численного обращения преобразования Лапласа или модификаций метода Дурбина. При поэлементном численном интегрировании используется метод Гаусса и иерархический алгоритм интегрирования, что позволяет достичь заданной точности интегрирования. На основе гранично-элементного подхода продемонстрировано влияние параметров вязкоупругих моделей на волновые картины откликов в конечных телах и на дневной поверхности полупространства. Результаты численных экспериментов сравниваются с решениями других авторов [4].

Разработано соответствующее параллельное программное обеспечение. Так как для решения задачи необходимо получить оригинал – применить обратное преобразование Лапласа, то с этой целью реализован алгоритм численного обращения преобразования Лапласа по методу Дурбина с распараллеливанием по частотам. Для построения параллельного алгоритма был использован последовательный алгоритм. Алгоритм был проанализирован на предмет наличия участков, которые могут быть вычислены независимо друг от друга. Анализ показал, что каждая итерация цикла по частотам может быть выполнена независимо от остальных. Для распараллеливания этого цикла была использована технология OpenMP [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091\_р\_поволжье\_а, 14-08-31415\_мол\_а, 14-08-31410\_мол\_а, 14-08-00811-а).

## Литература

1. Schanz M. Wave propagation in viscoelastic and poroelastic continua. Berlin: Springer, 2001.
2. Угодчиков А. Г., Хуторянский Н. М. Метод граничных элементов в механике деформируемого твердого тела. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1986.
3. Баженов В. Г., Игумнов Л. А. Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. М.: Физматлит, 2008.
4. Игумнов Л. А., Белова А. А., Литвинчук С. Ю. Об исследовании влияния вязкости материала на волновые поля перемещений и напряжений методом граничных элементов // Проблемы прочности и пластичности. 2006. Вып. 68. С. 161–169.
5. Chapman B., Jost G., Van der Pas R. Using openMP. Portable shared memory parallel programming. Massachusetts London, England: The MIT Press Cambridge, 2008.

## РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТРЕХМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОУПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Л. А. Игумнов, И. П. Марков, А. А. Белов, И. В. Воробцов*

НИИ механики ННГУ, г. Нижний Новгород

Доклад содержит краткий обзор работ, посвященный применению метода ГИУ к решению статических и динамических трехмерных краевых/начально-краевых задач линейной теории электроупругости. На основе теоремы взаимности Бетти и формулы Сомильяны приведены ГИУ прямого подхода в пространстве изображений по Лапласу. Представлена гранично-элементная дискретизация на основе регуляризованных ГИУ и согласованной поэлементной аппроксимации. Использован метод шагового численного обращения интегрального преобразования Лапласа. Дано описание программного комплекса.

Применяются выражения динамических фундаментальных решений для линейной теории электроупругости, полученные на основе интегрального преобразования Радона. Описаны различные подходы к вычислению статической части функций Грина: интегральный, полиномиальный, с применением рядов Фурье и интерполяционный. Приведены полутонные трехмерные визуализации статических функций Грина на единичной сфере для полностью анизотропного электроупругого материала. Представлен ряд численных экспериментов для верификации вычисления динамических анизотропных фундаментальных решений в виде суммы сингулярной и регулярной частей.

Решены статические задачи: о действии разности потенциалов, приложенной к  $\Gamma$ -образному однородному электроупругому телу; о действии вертикальной силы или заданной поверхностной плотности заряда на торец призматического электроупругого тела; о действии нагрузки на дневную поверхность электроупругого полупространства; контактная задача Герца для электроупругого полупространства и контактная задача Герца с дефектом. Дано решение задачи электроупругой динамики о совместном действии нагрузки в виде функции Хевисайда по времени и электрического потенциала на  $\Gamma$ -образное однородное электроупругое тело. Проведено сравнение полученных решений с известными аналитическими решениями и результатами других авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091\_р\_поволжье\_а, 14-08-31415\_мол\_а, 14-08-31410\_мол\_а, 14-08-00811-а).

### Литература

1. Norris A. N. Dynamic Green's functions in anisotropic piezoelectric, thermoelastic and poroelastic solids // Proc. R. Soc. Lond. A. 1994. 447. 175–188.
2. Wang C. Y., Achenbach J. D. Elastodynamic fundamental solution for anisotropic Solids // Geophys J Int. 1994; 118. 384–392.
3. Wang C. Y., Achenbach J. D. Three-dimensional time-harmonic elastodynamic Green's functions for anisotropic solids // Proc. R. Soc. Lond. A. 1995; 449. 441–458.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТРЕХМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПОРОУПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Л. А. Игумнов, А. Н. Петров, А. В. Аменицкий*

НИИ механики ННГУ, г. Нижний Новгород

Для исследования распространения волн в пористых средах наиболее часто используется модель пороупругой среды, предложенная Био [1–3]. Метод граничных элементов (МГЭ) может применяться к подобным исследованиям [4]. Интегральное уравнение динамической пороупругости на основе метода взвешенных невязок можно построить из объемного интеграла [4]. Методика построения дискретных аналогов ГИУ основана на гранично-элементном подходе к аппроксимации границы области, на обобщенных граничных перемещениях, обобщенных поверхностных силах и использовании методов численного обращения преобразования Лапласа [5]. Чтобы ввести ГЭ-дискретизацию, рассматривается регуляризованное уравнение. В качестве проекционного метода применялся метод коллокации. В итоге формируется система линейных алгебраических уравнений:

$$\frac{1-\alpha_{\Omega}}{2} \mathbf{v}_i^m + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^4 A_{ij}^{m,k,l} \mathbf{v}_j^{\chi(k,l)} = \sum_{k=1}^N B_{ij}^{m,k} \bar{t}_j^k, \quad (1)$$

$$\frac{1-\alpha_{\Omega}}{8} \mathbf{v}_i^m + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^4 A_{ij}^{m,k,l} \mathbf{v}_j^{\chi(k,l)} = \sum_{k=1}^N B_{ij}^{m,k} \bar{t}_j^k, \quad (2)$$

где  $N$  – число элементов границы. Для каждого уравнения системы (1), (2), записанного для узла коллокации  $y^{m_0}$ , соответствующие коэффициенты  $A_{ij}^{m_0,k,l}$  и  $B_{ij}^{m_0,k}$  дискретного аналога (ДА) можно вычислить независимо от коэффициентов уравнений, записанных в других коллокационных узлах. Параллельный алгоритм строится на базе последовательного [6]. Последовательно просматриваются в цикле все узлы аппроксимации граничных перемещений и находятся узлы коллокации, для которых формируются коэффициенты ДА. Каждая итерация цикла может быть выполнена параллельно с другими итерациями. Поток исполнения  $E_k$  выполняет каждую  $k$ -ую итерацию цикла последовательного алгоритма. Максимальное число потоков  $E_k$  равно числу итераций цикла по узлам. Таким образом, степень параллелизма алгоритма равна числу узлов аппроксимации обобщенных смещений. Для вычисления коэффициентов ДА уравнений (2) применяется аналогичный алгоритм.

Параллельный алгоритм реализован на языке Фортран с использованием библиотеки параллельных вычислений OpenMP [7] для реализации потоков исполнения. На этапе работы программы определяется количество ядер процессора и запускает такое же число потоков исполнения для достижения наибольшей производительности на данной ЭВМ.

### Литература

1. Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. Географ. и геоф. 1944. Т. 8, № 4. С. 65–78.
2. Biot M. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // J. Acoust. Soc. Am. 1956. Vol. 28, N 2. P. 168–178.
3. Biot M. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher-frequency range // J. Acoust. Soc. Am. 1956. Vol. 28, N 2. P. 179–191.
4. Schanz M. Wave propagation in viscoelastic and poroelastic continua. Berlin: Springer, 2001.

5. Белов А. А., Игумнов Л. А., Карелин И. С., Литвинчук С. Ю. Применение метода ГИУ для решения краевых задач трехмерных динамических теорий вязко- и пороупругости // Электронный журнал «Труды МАИ». 2010. Вып. 40. С. 1–20.

6. Breshears C. The Art of Concurrency. Published by O'Reilly Media, Inc., 2009.

7. Chapman B. Jost G., Van der Pas R. Using OpenMP. Portable Shared Memory Parallel Programming. Massachusetts London, England: The MIT Press Cambridge, 2008.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОРОУПРУГОСТИ МЕТОДАМИ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И РУНГЕ-КУТТЫ

*Л. А. Игумнов, Я. Ю. Ратаушко, С. Ю. Литвинчук*

НИИ механики ННГУ, г. Нижний Новгород

Доклад приводит краткое состояние вопроса по модели пороупругости Био с четырьмя базовыми функциями, по подходам ГИУ и МГЭ совместно с интегральным преобразованием Лапласа для решения динамических задач. Изложен метод квадратур сверток, а также его модификации с использованием методов Рунге-Кутты [1], а также схема «с ключом» на основе формул интегрирования сильно осциллирующих функций. Вычисление изображений искомых граничных функций ведется в параллельных потоках. Используется библиотека параллельных вычислений OpenMP. Проведено сравнение подходов на основе шаговых схем на узлах метода Эйлера и других методов семейства Рунге-Кутты [2].

Представлена система ГИУ прямого подхода в изображениях по Лапласу и гранично-элементная методика решения ГИУ. Шаговая схема опирается как на теорему о свертках оригиналов, так и на теорему об интегрировании оригинала. Для гранично-элементной дискретизации использованы четырехугольные восьмиузловые биквадратичные элементы, применяется метод коллокации. Аппроксимация обобщенных граничных функций построена по согласованной модели. Приведено описание программного обеспечения. Решены задачи о действии силы на торец пороупругого призматического тела; о действии вертикальной силы на поверхность однородного пороупругого полупространства и пороупругого полупространства с фиктивной границей; о действии вертикальной силы на полупространство, ослабленное полостью, двухслойное полупространство при различной толщине верхнего слоя, полупространство с выемкой в пороупругой постановке. Продемонстрирован эффект появления медленной волны. Представлено исследование влияния формы полости в полупространстве на форму откликов перемещений и порового давления в точке поверхности на заданном расстоянии от приложенной нагрузки. Результаты сравнивались с решениями других авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091\_р\_поволжье\_а, 14-08-31415\_мол\_а, 14-08-31410\_мол\_а, 14-08-00811-а).

### Литература

1. Lubich C., Ostermann A. Runge-Kutta methods for parabolic equations and convolution quadrature // Math. Comput. 1993. N 60. P. 105–131.

2. Banjai L., Messner M., Schanz M. Runge-Kutta convolution quadrature for the boundary element method // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2012. P. 90–101.

## БАЗОВАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ: ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ И ИХ ОТОБРАЖЕНИЯ НА АРХИТЕКТУРУ ЭВМ

*В. П. Ильин*

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

Рассматриваются вопросы автоматизации построения математических моделей и алгоритмов, а также их отображения на архитектуру многопроцессорных вычислительных систем (МВС) кластерного типа с гетерогенными узлами и многоуровневой иерархической памятью, реализуемые в рамках базовой системы моделирования (БСМ, см. [1], [2]), ориентированной на поддержку всех основных технологических этапов решения прямых и обратных междисциплинарных задач: геометрического и функционального моделирования [3], генерации адаптивных неструктурированных сеток [4], аппроксимации исходных постановок [5], решения получаемых алгебраических систем уравнений [6], условной минимизации функционалов в оптимизационных подходах решения обратных задач, постобработки и визуализации результатов расчета.

Описанные стадии поддерживаются соответствующими автономными подсистемами, составляющими ядро БСМ, взаимодействующими через унифицированные структуры данных (геометрические, функциональные, сеточные, алгебраические) и формирующими открытое интегрированное расширяемое программное окружение, ориентированное на длительный жизненный цикл и согласованную реализацию различными группами разработчиков, а также адаптируемое к эволюции суперкомпьютерных архитектур. Вычислительные инструментари БСМ обеспечивают оперативную сборку конфигураций пакетов прикладных программ (ППП) для конкретных предметных областей, а также интерфейсы для различных профессиональных пользователей. На всех вычислительных этапах осуществляется масштабируемое распараллеливание алгоритмов с отсутствием программных ограничений на число степеней свободы задачи, а также на количество используемых процессоров и ядер МВС. Избыточный состав алгоритмических библиотек позволяет оптимизировать содержание формируемых ППП, с учетом особенностей решаемой постановки, во избежание конфликтов между универсальностью и производительностью. Предлагаемые подходы иллюстрируются примерами методических и технологических решений.

### Литература

1. Ильин В. П., Скопин И. Н. Технологии вычислительного программирования // Программирование. 2011, № 4. С. 53–72.
2. Ильин В. П. Стратегии и тактики «заоблачного» математического моделирования // Труды Международной конференции ПАВТ'2014. Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2014. С. 99–107.
3. Голубева Л. А., Ильин В. П., Козырев А. Н. О программных технологиях в геометрических аспектах математического моделирования // Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии. 2012. Т. 10, № 2. С. 25–33.
4. Ильин В. П. DELAUNAY: технологическая среда генерации сеток // СибЖИМ. 2013. Т. 16, № 2(54). С. 83–97.
5. Бутюгин Д. С., Ильин В. П. CHEBYSHEV: принципы автоматизации построения алгоритмов в интегрированной среде для сеточных аппроксимаций начально-краевых задач // Труды Международной конференции ПАВТ'2014. Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2014. С. 42–50.
6. Бутюгин Д. С., Гурьева Я. Л., Ильин В. П., Перевозкин Д. В., Петухов А. В., Скопин И. Н. Функциональность и технологии алгебраических решателей в библиотеке Krylov // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. 2013. Т. 2, № 3. С. 92–105.

## ВЕКТОРИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

*Г. В. Ионов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики, г. Снежинск

Ранее нами был разработан метод адаптивного шаблона\* для анализа кристаллических структур. Он успешно применяется для обработки результатов молекулярно-динамических расчетов: для исследования фазовых переходов, для выделения дислокаций, вакансий и других типов дефектов. В отличие от других методов метод адаптивного шаблона дает наиболее чистую, не зашумленную картину на нагретых и деформированных образцах. Однако за качество определения структуры приходится платить большим объемом вычислений. Поэтому была произведена векторизация базовых алгоритмов выделения шаблонов и сопоставления их с отдельными атомами.

Для краткой и привычной записи выражений был разработан набор макросов, оборачивающих встроенные команды SSE4 и AVX. При этом одновременно была решена проблема повторяемости кода - один и тот же код может быть откомпилирован под любую из текущих архитектур процессора и легко адаптирован под возможное дальнейшее развитие векторных вычислений.

Самым базовым алгоритмом при сопоставлении шаблонов с атомными структурами является алгоритм сортировки небольшого множества числовых значений. Поэтому в первую очередь был разработан алгоритм векторной сортировки, превосходящий по скорости скалярную сортировку для множеств чисел мощностью менее 340. Массивы чисел для сортировки, возникающие в методе адаптивного шаблона, имеют мощность около 20. В этом случае ускорение достигает 5 раз по сравнению со скалярной сортировкой. Общее ускорение работы алгоритма составляет около 3 раз для SSE4 при представлении чисел с плавающей точкой в одинарной точности. Теоретически это ускорение должно будет существенно расти при использовании архитектур AVX256, AVX512 и т. д.

## МЕТОДЫ ПРОДОЛЖЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ЧАСТИ ГРАНИЦЫ

*С. И. Кабанихин<sup>1,3</sup>, М. А. Шишленин<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

<sup>2</sup>Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Рассматриваются некорректные задачи продолжения физических полей с части границы [1, 2, 3]. Подобные задачи возникают в таких приложениях, как геофизика, томография, ядерные реакторы.

Задача продолжения рассматривается в виде обратной задачи по отношению к некоторой прямой (корректной) задаче. Обратная задача формулируется в виде операторного уравнения  $Aq = f$ , для решения которого применяется метод минимизации целевого функционала и метод сингулярного разложения [2, 3]. Исследуются свойства оператора, и приводится алгоритм решения задачи

---

\*Сапожников Ф. А., Ионов Г. В., Дремов В. В. Метод адаптивного шаблона для анализа кристаллических структур и дефектов при молекулярно-динамическом моделировании высокоскоростных деформаций // Химическая физика. 2008. Т. 27, № 3. С. 63–70.

градиентным методом. На серии численных экспериментов показано, что восстановленные граничные условия на недоступной части границы позволяют определить параметры среды, расположенные вне исследуемой области.

В качестве примера рассмотрена задача продолжения стационарного теплового поля в недоступную для наблюдений зону. Построен итерационный алгоритм, восстанавливающий температуру и тепловой поток на недоступной части границы исследуемой области. Работа поддержана РФФИ грант 12-01-00773 и интеграционным проектом СО РАН № 14.

### Литература

1. Kabanikhin S. I. Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications. De Gruyter, Germany, 2011.

2. Kabanikhin S. I., Nurseitov D., Shishlenin M. A., Sholpanbaev B. B. Inverse problems for the ground penetrating radar // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2013. Vol. 21, N 6.

3. Kabanikhin S. I., Gasimov Y. S., Nurseitov D. B., Shishlenin M. A., Sholpanbaev B. B., Kasenov S. Regularization of the continuation problem for elliptic equations // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2013. Vol. 21, N 6

### РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ПО МОДЕЛИ ХАРТРИ – ФОКА – СЛЭТЕРА

*М. А. Кадатский, К. В. Хищенко*

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Представлены результаты численных расчетов термодинамических характеристик (в том числе ударных адиабат) смесей химических элементов Si и O по модели Хартри–Фока–Слэтера в широкой области давлений и температур. Исследована зависимость полученных результатов от выбора метода построения уравнения состояния для смеси. Проведено сравнение с результатами по другим квантово-статистическим моделям и имеющимися для диоксида кремния SiO<sub>2</sub> данными ударно-волновых экспериментов.

### СВОБОДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ EXACTPACK ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПРОВЕРКИ ДОСТОВЕРНОСТИ КОДОВ

*Дж. Р. Камм, С. У. Деблинг, Д. М. Израэл, Р. Синглтон*

Лос-Аламосская национальная лаборатория, г. Лос-Аламос, Нью-Мексико, США

Цель проверки достоверности (верификации) кодов состоит в получении документированных данных, на основании которых можно оценить, насколько точно код для расчета задач вычислительной физики считает математическую модель, реализованную в этом программном обеспечении. Для достижения этой цели авторами был создан пакет программ ExactPack, который служит для

получения точных решений для определенных физических моделей. Этот пакет программ, созданный в виде скрипта Python для программного обеспечения, служащего для получения точных решений, обладает удобным интерфейсом, который позволяет пользователю получать точные решения и представлять их в виде графиков с помощью графического интерфейса пользователя или интерфейса командной строки, тем самым обеспечивая работу в автономном или автоматическом режиме. Это программное обеспечение размещено на портале GitHub (github.com). Исходная версия этого программного обеспечения содержит программы для получения точных решений для нескольких известных одномерных задач физики сжимаемых сред, включая задачу Ноха, задачу Седова, а также одномерную задачу о распаде разрыва. В ExactPack приведено описание того, как можно добавить программы для получения других точных решений. Размещая это программное обеспечение на портале GitHub, мы призываем более широкое сообщество разработчиков программных кодов к размещению своего программного обеспечения для получения точных решений с целью его использования с ExactPack.

ExactPack входит в состав более крупной тестовой системы, позволяющей проводить согласованную и удобную в сопровождении оценку достоверности различных вычислительных кодов. Мы планируем стандартизировать процедуру тестирования кодов с целью проверки их достоверности, что обеспечит воспроизводимость и объективность оценки кодов. Такая стандартизированная процедура предусматривает использование единых постановок тестовых задач и получаемых с помощью ExactPack точных решений. Дополнительно были разработаны средства автоматизированного выполнения следующих функций: генерирование исходных данных, выполнение расчета, анализ достоверности кодов, документирование результатов и архивирование.

В настоящем докладе будет представлено описание пакета программ ExactPack и других элементов автоматизированной системы оценки достоверности кодов.

Настоящая работа была выполнена при поддержке компании Los Alamos National Security, LLC, Министерства энергетики США в Лос-Аламосской национальной лаборатории в рамках контракта DE-AC52-06NA25396. Тезисы доклада опубликованы в отчете Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-UR-14-24005.

## **РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ВИРТУАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОБЛОК» АЭС (ПТК «ВЭБ») И РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НА ЭНЕРГОБЛОКИ С РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ БН-1200**

*Д. В. Капица, Е. П. Образцов, В. Б. Козлов, В. А. Болнов<sup>1</sup>, И. С. Зотов<sup>1</sup>*

ОАО «Головной институт ВНИПИЭТ», г. Санкт-Петербург

<sup>1</sup>ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения  
им. И. И. Африкантова», г. Нижний Новгород

Проекты энергоблоков АЭС наряду с обоснованием безопасности должны проходить процедуру верификации – проверки проекта и его отдельных частей на моделях и экспериментальных данных, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ. В актуальной ревизии Европейских требований (EUR(D)) проект АЭС должен сопровождаться «инженерным симулятором» или моделирующим комплексом, который помимо верификации проектных решений должен использоваться как средство поддержки эксплуатирующей организации.

Эффективным инструментом для решения указанных задач может быть многоуровневая система детальных полномасштабных компьютерных моделей элементов АЭС, одним из элементов которой должен быть программно-технический комплекс (ПТК), включающий математическую модель энергоблока.

В рамках ФЦП «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий» за 2010–2012 гг. была реализована пилотная версия Виртуального энергоблока (ВЭБ) ЛАЭС-2, а ПТК «ВЭБ» получил новый импульс к развитию и применению для АЭС с ВВЭР в части проверки проектных решений.

ПТК «ВЭБ» АЭС представляет собой комплекс расчетных кодов, объединенных в отдельную мультизадачу с программными оболочками, обеспечивающими выполнение расчета, связь кодов и графический интерфейс ввода вывода, а также аппаратные средства, необходимые для эмуляции пульта. В качестве управляющего программного комплекса используются ПК SimInTech (3В Сервис) и ПК ТЕРМИТ (НИТИ), для организации взаимодействия кодов на СуперЭВМ используется ПС SMM (РФЯЦ ВНИИЭФ).

ВЭБ АЭС-2006 прошел стадию разработки и первичной апробации на базе ВЭБ ЛАЭС-2 и используется в ОАО «Головной институт ВНИПИЭТ» для валидации технических и технологических решений по системам и оборудованию энергоблока, а также для отработки алгоритмов управления оборудованием и системами ЛАЭС-2, Белорусской АЭС и Тайваньской АЭС.

ВЭБ ЛАЭС-2 продолжает развиваться по пути увеличения включаемых в его состав моделей систем АЭС и их детализации, а ПТК «ВЭБ» по пути совершенствования расчетных кодов. Такое развитие модели ведет к существенному увеличению потребностей в высокопроизводительных вычислительных ресурсах и как следствие к применению технологий параллельных вычислений и оптимизации расчетных кодов. В настоящее время функционал комплекса расширен за счет включения в него кода улучшенной оценки КОРТЕС (РФЯЦ ВНИИЭФ и ВНИПИЭТ) и расчетного кода РАСНАР-БН (ОКБМ). Ведутся работы по распараллеливанию кода КОРТЕС и модернизации ПС SMM.

В 2013 году с учетом опыта ВЭБ АЭС с ВВЭР, специалистами ОКБМ и ВНИПИЭТ была разработана пилотная версия модели ВЭБ АЭС с реакторной установкой БН-1200. Смоделированы основные системы АЭС – реакторная установка (ОКБМ), паротурбинная установка (ВНИПИЭТ), базовые элементы систем контроля и управления, виртуального блочного пульта управления.

Главной особенностью данной работы является создание ВЭБ на этапе разработки технического проекта, что позволяет проводить проверку эффективности принимаемых технических и технологических решений по основным и вспомогательным системам, оптимизацию алгоритмов управления оборудованием и системами в различных режимах работы энергоблока.

В настоящее время идет детализация моделей реакторной и паротурбинной установок, расширение моделирования СКУ. В дальнейшем планируется увеличить объем ВЭБ АЭС с БН-1200 до 60 основных, вспомогательных и электротехнических систем АЭС. Для разработки теплогидравлических моделей третьего контура будет использоваться код улучшенной оценки КОРТЕС, расчет электротехнических систем будет проводиться в фазных координатах.

## МАССИВНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПРЕДОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИТЕРАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ БОЛЬШИХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РАЗРЕЖЕННЫХ СЛАУ

*И. Е. Капорин<sup>1</sup>, О. Ю. Милюкова<sup>2</sup>, Ю. Г. Бартенева<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ВЦ РАН, г. Москва

<sup>2</sup>ИИПМ РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Часто встречающейся трудоемкой стандартной вычислительной задачей является решение невырожденных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженной невырожденной матрицей коэффициентов большого размера. Для таких задач известны преимущества предобу-

словленных итерационных методов (прежде всего, сравнительно небольшой расход рабочей памяти) по сравнению с методами точной разреженной треугольной факторизации. Однако ситуация может измениться, если требуется решать задачи с плохо обусловленными несимметричными матрицами, эффективно используя большое число процессоров. Причиной является как снижение надежности и экономичности итерационных схем в несимметричном случае, так и необходимость использования сравнительно слабых массивно-параллельных предобусловливателей. Это часто приводит к замедлению сходимости итерационных методов или даже к их отказу. Например, известно, что стандартные итерации BiCGStab с блочно-диагональным ILU-предобусловливанием зачастую не обеспечивают достаточную надежность и эффективность расчетов [3].

Предлагаемые решатели СЛАУ основаны на предобусловливании (связанном с неполным обратным треугольным разложением), реализующем специальный способ согласования приближенных треугольных факторизаций перекрывающихся главных подматриц исходной матрицы коэффициентов [1–3]. Количество используемых подматриц принимается равным доступному числу процессов MPI, что обеспечивает хорошую параллельную масштабируемость [2, 3]. Рассматриваются способы преодоления сбоев приближенных треугольных факторизаций подматриц (коррекция диагональных элементов, несимметричные перестановки столбцов). Также предлагается использование дополнительного уровня полиномиального предобусловливания, позволяющего как существенно улучшить параллельную эффективность алгоритма, так и радикально сократить число итераций метода GMRES. С этой целью был разработан новый экономичный алгоритм построения многочлена, реализующего предобусловливание нужного качества [4]. Приводятся результаты тестирования соответствующих решателей СЛАУ с использованием матриц, предоставленных ВНИИЭФ, на вычислительной системе ЭВМ ВЦКП ВНИИЭФ при числе процессов MPI до 3000, свидетельствующие о хорошей надежности и параллельной масштабируемости предлагаемых алгоритмов.

Предварительные версии описанных разработок были использованы при создании комплекса программных модулей (библиотека VC\_RAN\_SLAU), предназначенного для приближенного решения больших разреженных систем линейных алгебраических уравнений с симметричными положительно-определенными и несимметричными матрицами. Созданный программный код, написанный на языке FORTRAN-90 с использованием интерфейса MPI, удовлетворяет достаточно высоким требованиям надежности и эффективности функционирования, отличаясь в то же время небольшим объемом (менее 200 Kbytes текста) и полной замкнутостью. Библиотека создавалась для использования в пакетах программ инженерного анализа, разработанных ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» [5].

Работа поддерживалась Целевыми программами П-15 и П-18 президиума РАН, грантом РФФИ 11-01-00786, грантом НШ-5264.2012.1 и программой ОМН №3 РАН.

## Литература

1. Kapurin I. E., Konshin I. N. A parallel block overlap preconditioning with inexact submatrix inversion for linear elasticity problems // Numerical Linear Algebra with Applications. 2002. Vol. 9. P. 141–162.
2. Капорин И. Е., Милюкова О. Ю. Массивно-параллельный алгоритм предобусловленного метода сопряженных градиентов для численного решения систем линейных алгебраических уравнений // Оптимизация и приложения: сб. трудов отдела проблем прикладной оптимизации ВЦ РАН / Под ред. В. Г. Жадана. М.: Изд-во ВЦ РАН, 2011. С. 132–157.
3. Капорин И. Е., Милюкова О. Ю., Бартенев Ю. Г. Массивно-параллельные предобусловленные методы решения СЛАУ с разреженными матрицами большого размера // Материалы XIII Всероссийской конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах». Н. Новгород, 14–16 ноября, 2013 / Под ред. проф. В. П. Гергеля. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. С. 151–156.
4. Капорин И. Е. Дискретный метод наименьших квадратов для полиномиального предобусловливания несимметричных матриц // Оптимизация и приложения: сб. трудов отдела проблем прикладной оптимизации ВЦ РАН / Под ред. В. Г. Жадана. Вып. 3. М.: Изд-во ВЦ РАН, 2013. С. 120–139.

5. Бартенев Ю. Г., Бондаренко Ю. А., Ерзунов В. А. и др. Комплекс LParSol для решения СЛАУ // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 34–36.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНОЙ СУПЕРЭВМ АПК 1М ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ ВОЛНОВОДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

*Е. М. Карчевский, Н. Б. Плещинский, А. О. Спиридонов*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

В последнее время при исследовании собственных мод оптических волокон произвольного сечения основное внимание уделяется разработке эффективных и надежных вычислительных методов. Для расчета собственных мод оптических волокон используются различные методы, в том числе, метод конечных элементов, метод конечных разностей, лучевой метод, метод сплайнов и метод коллокаций, а также спектральный метод.

Наибольших вычислительных затрат требует случай, когда исходная задача формулируется как интегральное уравнение [1]. В частности, задача о поверхностных и вытекающих модах слабо-направляющего оптического волновода с разрывным показателем преломления рассматривалась в наших предыдущих работах. Исходная задача была сведена к нелинейной несамосопряженной спектральной задаче для системы слабо сингулярных граничных интегральных уравнений. Интегральный оператор аппроксимировался методом коллокаций и методом Галеркина. Сходимость и достоинства этих численных методов подтвердил вычислительный эксперимент [2]. Метод коллокаций имеет лучшую скорость сходимости.

В этой работе мы используем метод коллокаций для расчета собственных мод оптического волокна с разрывным показателем преломления. Основная трудность состоит в вычислении хорошего начального приближения для собственных значений нелинейной несамосопряженной спектральной задачи. Мы предлагаем использовать сингулярное разложение матрицы метода коллокаций. Вычислительный эксперимент показал практическую эффективность такого подхода, но метод сингулярного разложения связан с большими вычислительными затратами. В связи с этим вычисления проводились на компактной суперЭВМ АПК-1М, использовались технологии параллельных вычислений OpenMP и MPI. Разработанный пакет программ может быть использован при численном моделировании новых типов оптических волокон.

Компактная суперЭВМ АПК-1М может применяться также для численного решения других задач волноводной электродинамики [3].

### Литература

1. Даутов Р. З., Карчевский Е. М. Метод интегральных уравнений и точные нелокальные граничные условия в теории диэлектрических волноводов. Казань: Казан. гос. ун.-т, 2009.
2. Карчевский Е. М., Плещинская И. Е., Спиридонов А. О. Проекционные методы решения задач о собственных волнах диэлектрического волновода с кусочно-постоянным показателем преломления // Вестник Казанск. гос. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 20. С. 7–11.
3. Плещинский Н. Б. Модели и методы волноводной электродинамики. Казань: Казан. гос. ун.-т, 2008.

## ОПЫТ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АСИНХРОННОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ПОТОКОВОГО СУПЕРВЫЧИСЛИТЕЛЯ ППВС «БУРАН»

*А. В. Климов, Т. Г. Козлова*

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва

Масштабирование задач молекулярной динамики на суперкомпьютерах затрудняется наличием в алгоритмах глобальных барьеров, связанных с организацией пересчета списков соседей. Актуальной является задача написания полностью асинхронного и эффективного алгоритма, опирающегося исключительно на локальные взаимодействия между процессорами, обрабатывающими соседние области. Аналогичные цели ставились другими авторами, при этом использовались традиционные подходы программирования взаимодействий на кластерах: MPI, специальная RDMA библиотека [1], Java RMI [2].

Нами используется потоковая модель вычислений, опирающаяся на односторонние сообщения – токены. Она реализуется потоковым супервычислителем ППВС «БУРАН» [3] и хорошо подходит для написания асинхронных алгоритмов. Распараллеливание производится по принципу пространственной декомпозиции, когда каждый процессор (ядро) отвечает за обработку частиц, находящихся в своей области пространства – кубоиде.

Мы используем метод средней точки (midpoint method), предложенный в работе [1]. Это один из методов «нейтральной территории», в которых расчет взаимодействия производится не обязательно ядром, отвечающим за одну из частиц пары. В данном методе расчет выполняется ядром, в кубоид которого попадает середина отрезка, соединяющего пару частиц. Как показано в [1], в этом варианте объем импортируемой информации о частицах минимален.

Расчет сил проводится с использованием потенциала Леннарда-Джонса. Учитываются пары частиц, удаленные друг от друга на расстояние не более радиуса отсечения  $R_c$ . Предполагается, что  $1 < R_c/b < 2$ , где  $b$  – длина стороны кубоида. Уравнения движения интегрируются методом Верле.

В отличие от классического подхода, основанного на формировании и поддержании списков соседей, в методе средней точки в каждом цикле моделирования в кубоид импортируются состояния всех частиц из области импорта, которая простирается не далее чем на 26 соседних кубоидов. Синхронизация опирается только на попарные взаимодействия между соседними ядрами.

Реализация в ППВС имеет уровень зернистости до частиц, то есть состояние каждой частицы передается отдельным токеном с полем данных размером 32 байта. Частица сначала передается двум соседям по Z, затем каждая копия передается соседям по Y, затем по X. Это экономит нагрузку на каналы передачи по сети. Силы суммируются по представителям частиц в каждом ядре, после чего передаются, если требуется, обратно в домашний процессор каждой частицы. Миграция частиц между процессорами объединена с фазой импорта частиц и не требует отдельной коммуникационной фазы.

Поскольку каждая частица передается отдельно, синхронизация обеспечивается счетчиками. Отправитель подсчитывает количество частиц, отправляемых в каждое соседнее ядро, и передает это число туда же, где после их принятия завершается расчет взаимодействий и предварительное суммирование сил. Переданные обратно силы окончательно суммируются, причем завершение суммирования определяется асинхронно по каждой частице, что позволяет начинать расчет уравнения движения и последующий цикл для каждой частицы независимо от других.

Наша работа на данном этапе направлена не на получение значимого прикладного результата, а на определение возможностей и эффективности применения ППВС для задач молекулярной динамики. Предполагается провести серию прогонов как на потактовой модели ППВС, так и на ее эмуляторе на суперкомпьютере. Результаты будут доложены на конференции SMM-2014. Аналогичный вопрос для другой прикладной задачи был рассмотрен в работе [5].

Интересно сравнить возможности и эффективность проектируемой ППВС «Буран» как универсального программируемого супервычислителя, применяемого к задачам молекулярной динамики, с теми же свойствами машины Anton [4], разработанной специально для этих задач компанией D. E. Shaw Research. Будучи построенной из очень специализированных микросхем, эта машина показала 100-кратное превосходство против традиционных кластерных суперЭВМ. Учитывая, что Anton имеет некоторое сходство с ППВС «Буран» (например, потоковая организация вычислений и коммуникаций), мы надеемся, что ППВС «Буран» займет промежуточное положение между традиционными универсальными системами кластерного типа и узко ориентированными машинами специального назначения.

### Литература

1. Bowers K. J., Chow E., Xu X., Dror R. O., Eastwood M. P., Gregersen B. A., Klepeis J. L., Kolossvary I., Moraes M. A., Sacerdoti F. D., Salmon J. K., Shan Y., Shaw D. E. Scalable algorithms for molecular dynamics simulations on commodity clusters: Proceedings of the ACM/IEEE Conference on Supercomputing (SC06), Article N 84, New York, NY: IEEE, 2006.
2. Mederski J., Mikulski L., Bala P. Asynchronous parallel molecular dynamics simulations // Lecture Notes in Computer Science. 2008. Vol. 4967. P. 439–446.
3. Стемповский А. Л., Левченко Н. Н., Окунев А. С., Цветков В. В. Параллельная потоковая вычислительная система — дальнейшее развитие архитектуры и структурной организации вычислительной системы с автоматическим распределением ресурсов // Информационные технологии. 2008, № 10. С. 2–7.
4. Dror R. O., Young C., Shaw D. E. Anton, a special-purpose molecular simulation machine // Encyclopedia of parallel computing, Springer, 2011. P. 60–71.
5. Климов А. В., Поликарпов М. И. Опыт программирования одной задачи квантовой теории поля для потокового суперпроцессора ППВС «БУРАН» // Труды XIV Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 105–106.

## ЗОННЫЙ RANS-LES ПОДХОД НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЙНОЛЬДСОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*А. С. Козелков, В. В. Курулин, О. Л. Пучкова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Наиболее применимыми при решении промышленных задач являются RANS модели турбулентности [1], которые характеризуются устойчивым итерационным процессом и приемлемыми результатами для большинства практически важных типов течений. Однако, они не являются универсальными и это налагает определенные требования к их применимости на практике.

Альтернативой здесь является метод крупных вихрей LES [2], который позволяет получить хорошие результаты как для присоединенных, так и для отрывных течений. Однако метод LES требует значительных вычислительных ресурсов и его использование в промышленных приложениях будет возможно лишь по прошествии нескольких десятилетий [3]. Выходом здесь является использование зонного RANS-LES подхода [4] с применением синтетической генерации турбулентных флуктуаций скорости на входных границах LES области. Опубликованные в открытой печати рабо-

ты и результаты исследований ведущих мировых специалистов показывают, что гибридный RANS-LES подход применим для турбулентных течений с любым масштабом отрывной зоны и наиболее универсален в настоящее время для описания нестационарных турбулентных течений, а требуемые вычислительные затраты сопоставимы с затратами для использования моделей отсоединенных вихрей DES (Detached-Eddy Simulation).

В докладе рассмотрено использование в зонном RANS-LES подходе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений [5] в качестве базовой модели, что улучшает точность расчета на границе области RANS-LES в задачах с существенно ассиметричными зонами течений. Проанализированы численные схемы дискретизации и выделены те, которые обеспечивают как приемлемую численную диссипативность для подсеточной модели LES, так и устойчивый счет. Представлена альтернативная схема для дискретизации конвективных слагаемых. Также уделено внимание технологии реализации данного подхода при использовании неструктурированных расчетных сеток. На задачах внутренней гидродинамики показана эффективность представленного алгоритма и требуемые вычислительные ресурсы для промышленно-ориентированных задач.

Работа выполнена при поддержке при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 13-07-12079-офи\_м.

### Литература

1. Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. Санкт-Петербург: «Судостроение», 2005.
2. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008.
3. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations // Heat Fluid Flow. 2000. Vol. 21. P. 252–263.
4. Jarrin N., Benhamadouche S., Laurence D., Prosser R. A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2006. Vol. 27, N 4. P. 585–593.
5. Menter F. R., Garbaruk A. V., Egorov Y. Explicit algebraic Reynolds stress models for anisotropic wall-bounded flows // Proc. of 3rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS), Versailles, July 6–9th, 2009.

## ПРИМЕНЕНИЕ RANS МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ С НИЗКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ

*А. С. Козелков, Е. С. Тятюшкина, В. В. Курулин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Основную роль в процессе теплопередачи при течении жидкостей и газов в промышленных установках играют конвективные тепловые потоки, обусловленные естественно-конвективным и вынужденно-конвективным движением теплоносителей. Для моделирования конвективного теплообмена, который может проходить как в ламинарном, так и в турбулентном режимах используются соответствующие модели. Практически во всех промышленных установках течения теплоносителей различного типа происходит при высоких числах Рейнольдса, соответствующих турбулентному режиму течения, характеризующегося зависимостью вязкости и теплопроводности от ло-

кальных характеристик потока. Этот факт в существенной степени осложняет численное моделирование.

Течения жидкометаллических теплоносителей характеризуются малыми числами Прандтля и высокими числами Рейнольдса. Турбулентный теплоперенос в них определяется как молекулярным, так и турбулентным коэффициентом теплопроводности. Причем, в отличие от обычных жидкостей и газов, где молекулярная теплопроводность доминирует в вязком подслое вблизи стенок, величины молекулярного и турбулентного коэффициентов в жидких металлах сопоставимы во всем потоке.

С точки зрения численного моделирования течений жидкометаллических теплоносителей основной проблемой является турбулентность. Причина в том, что в настоящее время, да и в ближайшем будущем, на практике используются и будут использоваться RANS модели турбулентности, основанные на гипотезе Буссинеска. Данные модели не являются универсальными и, как правило, существующие десятки их модификаций «откалиброваны» для моделирования конкретных типов течений и, вообще говоря, для жидких металлов должна быть своя RANS модель, верифицированная на надежных экспериментальных данных.

К RANS моделям турбулентности, позволяющим моделировать течения с низкими числами Прандтля, относятся модели AKN [1–2] и S&S [3]. В данных моделях содержатся дополнительные слагаемые и уравнения, которые отвечают за расчет молекулярной теплопроводности во всех областях расчета.

В докладе представлено описание моделей AKN и S&S. Представлены расчеты по данным моделям задачи обтекания обратного уступа с подогреваемой стенкой за ним вязким несжимаемым газом и задачи турбулентного течения натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что модели турбулентности AKN и S&S дают наилучшие результаты, что закономерно, так как они позиционируются для более точного расчета теплопроводности по сравнению с другими RANS моделями.

### Литература

1. Abe K., Kondoh T., Nagano Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows – I. Flow field calculations, Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi-ken 480-11, Japan, 1993.
2. Abe K., Kondoh T., Nagano Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows – II. Thermal field calculations, Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi-ken 480-11, Japan, 1994.
3. Sommer T. P., So R. M. C., Lai Y. G. A near-wall two-equation model for turbulent heat fluxes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1992. 35. 3375–3387.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ МАСШТАБИРУЕМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ В ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

*А. С. Козелков, Р. М. Шагалиев, Ю. Н. Дерюгин, В. В. Курулин, А. В. Ялозо, С. В. Лашкин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Совершенствование вычислительных технологий идет по пути перехода от анализа отдельных конструктивных элементов к всеобъемлющему трехмерному анализу поведения технологиче-

ских комплексов в целом. Достижения вычислительной гидродинамики позволяют уйти от расчета обособленных частей и включить в рассмотрение смежные области, а также специфические технологические особенности, которые влияют на эффективность работы промышленного изделия в целом. Возможность учета при численном моделировании сложных конструктивных особенностей существенно улучшает характеристики изделия уже на ранней стадии проектирования.

Требования, предъявляемые к процессу математического моделирования поведения промышленных конструкций, не могли не сказаться на развитии методов вычислительной гидродинамики. В настоящее время все больший и больший акцент делается на построение эффективных методов расчета на произвольных неструктурированных сетках, состоящих из многогранников произвольной формы.

Длительный опыт применения методов вычислительной гидродинамики в интересах решения промышленных задач показал, что из всех нерешенных проблем наиболее важными с фундаментальной точки зрения являются турбулентность и время проведения расчета. Обе эти проблемы достаточно тесно связаны друг с другом.

В докладе представлены результаты исследований по применению современных численных методов и моделей турбулентности для решения промышленных задач. Акцент сделан на применении произвольных неструктурированных сеток на машинах петафлопсного класса. Исследован потенциал применения методов моделирования турбулентных течений для различных классов задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект офи\_м № 13-0712079).

## **ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ – ДОБЫВАЮЩАЯ СКВАЖИНА, ОБОРУДОВАННАЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ЭЛЕКТРОНАСОСОМ»**

*В. М. Конюхов, И. В. Конюхов, С. В. Краснов<sup>1</sup>*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

<sup>1</sup>Научно-производственный центр «Нефтегаз», г. Саров

Математическое и численное моделирование сложных процессов тепломассопереноса при течении многофазных сред в трубах добывающих скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), являются одним из наиболее эффективных и экономичных способов исследования режимов работы механизированного подъемника, оптимизации и подбора подземного оборудования. При этом необходимо учитывать, что насосная скважина и пласт представляют собой единую систему, характеризующую тесной взаимосвязанностью происходящих в ней термогидродинамических процессов, причем нередко УЭЦН эксплуатируются при достаточно низких значениях давления на входе в первую ступень насосного узла, когда объемное расходное газосодержание в потоке достигает 30–40 %. Такое количество свободной газовой фазы в перекачиваемой продукции существенно ухудшает напорные и энергетические характеристики насоса. Поэтому важным моментом повышения надежности работы подъемника перед началом его эксплуатации является правильный подбор (если считать критерием оптимальности максимум КПД УЭЦН) типа установки и определение глубины ее размещения в скважине, согласованные с конкретными свойствами пластовой продукции, геометрическими параметрами наклонно-направленной скважины и фильтрационно-емкостными свойствами пласта. Кроме того, в процессе эксплуатации скважины со временем может произойти изменение состава продукции на забое скважины, и, соответственно, – на входе в первую ступень ЭЦН, в результате которого насос начинает работать вне оптимальной области интегральных характеристик «напор – подача», «КПД – подача», «мощность – подача», что приводит к перегрузу либо недогрузу погружного электродвигателя (ПЭД), вращающего вал уста-

новки. В таких случаях можно попытаться оптимизировать работу насосного оборудования и всей системы «пласт – скважина» без прекращения их работы с помощью современных наземных средств. В настоящее время для этой цели могут быть использованы, прежде всего:

1) станции управления, предназначенные не только для приема и контроля рабочих параметров двигателя и насоса, измеряемых телеметрическими датчиками, но и для изменения режима работы ПЭД за счет изменения величины его напряжения или частоты силы тока;

2) специальные штуцерные устройства, позволяющие изменить сечение трубы на устье скважины.

Даны формулировки перечисленных задач оптимизации и управления. Для их решения используется программно-технический комплекс ИСКЕНДЕР, разработанный на основе современных методов математического и численного моделирования процессов, происходящих при движении многофазных потоков в трубах скважины, проточных каналах электроцентробежного насоса и пористой среде пласта. На конкретных примерах рассмотрены решения задач:

- рационального подбора подземного оборудования к скважине,
- определения оптимальной глубины спуска УЭЦН в скважине,
- оптимизации текущих режимов работы насосных установок в добывающих наклонно-направленных скважинах с вертикальным окончанием посредством частотного и штуцерного регулирования их работы с помощью наземных станций управления,
- оптимизации сборки УЭЦН за счет ее компоновки ступенями различного типа.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ И СИСТЕМЕ ВСКРЫВАЮЩИХ ЕГО СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ**

*В. М. Конюхов, И. В. Конюхов, А. Н. Чекалин*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

Математические модели, применяемые для расчета процессов теплопереноса в отдельных элементах комплекса «нефтяной пласт – система добывающих и нагнетательных скважин», должны учитывать специфические особенности многофазных потоков в областях их движения – соответственно, в пористой среде и трубах скважин. Если в добывающих скважинах для подъема пластовой продукции используются установки погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН), то возникает еще одна группа областей течения газожидкостных смесей – проточные каналы рабочих ступеней насосных узлов, которые в свою очередь могут иметь собственные конструктивные особенности. Эти модели, как правило, сами по себе представляют собой сложные системы нелинейных дифференциальных уравнений различного типа, существенно отличающиеся методами их численного решения. Расчет термогидродинамических процессов во всем комплексе как едином целом невозможен без совместного решения этих систем уравнений, что приводит к дополнительным трудностям, обусловленным значительными затратами машинного времени для проведения многовариантных вычислительных экспериментов. Эффективность реализации подобных расчетов и решения связанных с ними задач анализа, прогнозирования и оптимизации рабочих характеристик всех элементов комплекса «пласт – система скважин» может быть существенно повышена за счет использования многопроцессорных компьютеров и суперЭВМ, технологий параллельных вычислений и алгоритмических языков программирования.

Для описания процессов, происходящих в неоднородном нефтяном пласте, вскрытом системой произвольно расположенных нагнетательных и добывающих скважин, оборудованных УЭЦН,

построена замкнутая математическая модель. Фильтрационный двухфазный двухкомпонентный (вода, нефть) поток рассматривается в изотермическом приближении без учета капиллярных эффектов, силы тяжести, сжимаемости фаз и пористой среды в осредненном по мощности пласте, абсолютная проницаемость, пористость и толщина которого могут существенно меняться по плановому простиранию. Вычисление характеристик течения трехфазных смесей в трубах наклонно-направленной скважины и проточных каналах центробежного насоса осуществляется на основе математических моделей, учитывающих эффекты неизотермичности, фазовых переходов (разгазирование нефтяной фазы в скважине и растворение газа в нефти в каналах насоса), сжимаемость фаз, трение, влияние силы тяжести, изменение структурных форм течения смеси, возможную инверсию жидких фаз и проскальзывание дисперсных составляющих потока, его теплообмен с окружающей средой. Пересчет характеристик работы ступеней ЭЦН с воды на неоднородные среды базируется на полуэмпирической методике П. Д. Ляпкина, модифицированной с целью упрощения алгоритма вычислений напора, мощности, КПД ступени ЭЦН и параметров работы погружного электродвигателя (ПЭД) в зависимости от свойств перекачиваемой трехфазной смеси и частоты электрической сети, питающей установку. Условия сопряжения решений систем дифференциальных уравнений на границах соответствующих областей замыкают общую модель.

Для решения задачи используется метод конечных разностей и итерационные алгоритмы. Численная модель реализована в программном комплексе Oil-RWP на языке C# с использованием библиотеки параллельных вычислений Task Parallel Library (TPL) из платформы .NET Framework 4.0 и набора библиотек NVIDIA CUDA. Этот пакет позволяет выполнять расчет взаимосвязанных процессов в едином комплексе «пласт – система скважин» с одновременной визуализацией результатов и его взаимодействием со специальным программным модулем SCS, имитирующим работу контроллеров наземных станций управления добывающих скважин. При этом из пакета Oil-RWP в SCS поступают «телеметрические» данные и текущие параметры работы ПЭД (прямая связь). В свою очередь контроллер анализирует поступающие данные и вырабатывает необходимые параметры управления погружной установкой, передаваемые в пакет Oil-RWP (обратная связь).

Распараллеливание расчетов проводится:

- 1) при решении фильтрационной задачи в неоднородном пласте на сетке, которая может содержать десятки и сотни тысяч узлов;
- 2) при расчете термогидродинамических процессов в добывающих насосных скважинах, количество которых может достигать нескольких сотен, так что общее число сеточных узлов во всех скважинах может значительно превосходить количество узлов в пласте;
- 3) при визуализации двумерных полей расчетных и исходных характеристик фильтрационного процесса на дисплее, когда количество пикселей достигает нескольких миллионов.

Дан анализ результатов вычислительных экспериментов, иллюстрирующих работоспособность построенной модели и эффективность применения методов распараллеливания на примере расчетов характеристик разработки одного из действующих нефтяных месторождений РФ.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОД ГОЛОВНЫМИ ОБТЕКАТЕЛЯМИ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА АКТИВНОМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА**

*А. А. Костарев, С. Н. Королев*

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр  
«ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Основная задача современной промышленности – создание глобально конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения в кратчайшие сроки. Для успешного решения этой

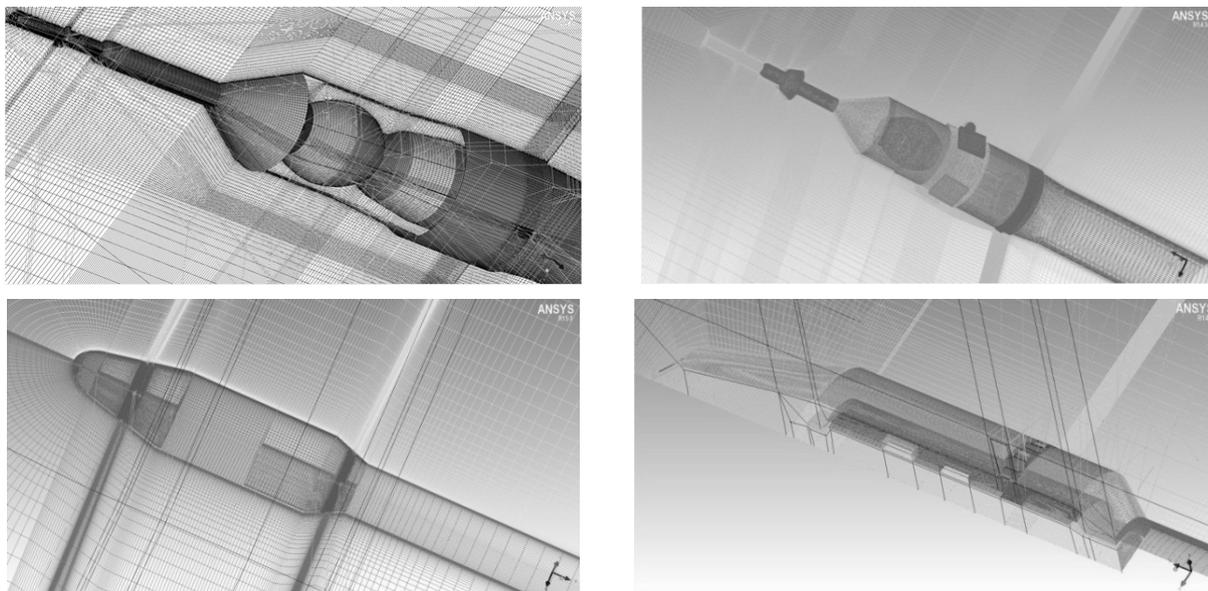
задачи необходимы постоянная генерация, применение, накопление и трансфер новых знаний, создание и развитие наукоемких технологий с последующим их объединением в технологические цепочки нового поколения, разработка наукоемких инноваций и создание современных «цифровых»/«умных» производств\*.

Представлена комплексная инженерная методика определения аэродинамических характеристик и, в частности, газодинамических параметров под головными обтекателями (ГО) РКН на активном участке полета. Технология основана на использовании крупномасштабных вычислений на многопроцессорных суперЭВМ, средствами CFD и применена впервые в комплексе к данному конкретному классу задач. Для ряда различных компоновок, приближенных по своим параметрам к существующим изделиям РКТ, проведен расчет с целью сравнения полученных результатов с летными данными для последующего применения отработанной технологии расчета к вновь проектируемым изделиям. Данная технология является актуальной, так как проведение экспериментальных испытаний определения газодинамических параметров под ГО по времени не представляется возможным и порой подтверждение аналитических расчетов производится только по результатам летных замеров.

Технология основана на моделировании реальной траектории выведения и позволяет синтезировать близкие к фактическим условия, действующие в полете для реальных изделий, как снаружи, так и внутри ГО, что, в свою очередь, позволяет с большой точностью определять расчетные величины.

В рамках задействования высокопроизводительных ресурсов становится возможным обработать большое число вариантов форм дренажных отверстий, а также различных объемов изделий, находящихся под ГО, с целью оптимизации действующих на них нагрузок, полученных в результате аналитических расчетов.

С целью получения максимального приближения к реальной газодинамической картине течения необходима генерация качественных структурированных гексагональных сеточных моделей внешней области и области под ГО, связанных между собой (рисунок). Проводится раздельная инициализация расчетных объемов. Данная особенность является обязательной для уменьшения общего времени расчета, когда отбрасывается участок траектории с достаточно малыми скоростями изменения параметров внешнего потока, существенно не влияющими на последующее изменение газодинамической структуры потока под ГО.



Сеточные модели характерных компоновок ГО и полезного груза под ними

\*Боровков А. И. Компьютерный инжиниринг : учеб. пособие – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.

Вычисления проводились с использованием пакетов ANSYS Fluent 13.0 и ЛОГОС 4.0.1 на моделях размерностью от 450 тыс. до 3 млн. элементов с задействованием от 32 до 1080 вычислительных ядер.

Получена визуализация расчетной картины обтекания внешнего потока по времени на ГО, структура потока внутри ГО и в окрестности дренажных отверстий. Получены расчетные результаты градиента и перепадов давления, температуры под ГО по времени полета, хорошо согласующиеся с летными замерами. Методика использована для вновь проектируемых изделий.

В рамках отработки полученной методики оптимизированы размерность сеточных моделей и расчетных областей, параметры решателей и общее время вычислений.

Расчеты выполнялись на гражданском сегменте суперЭВМ «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров, а также на Суперкомпьютере «Сергей Королев» суперкомпьютерного центра СГАУ (<http://hpc.ssau.ru/>).

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ МНОГОБЛОЧНЫХ СТРУЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ПРЕГРАДАМИ

*М. О. Кравчук, Н. Ф. Кудимов, А. В. Сафронов*

Центральный НИИ машиностроения, г. Королев

Рассматривается взаимодействие сверхзвуковых турбулентных струй продуктов сгорания с преградами сложной формы при натекании под различными углами. Формы преград – плоская плита, цилиндрическая полость и стакан. Течение характеризуется сложной пространственной структурой, наличием турбулентных зон, ударно-волновой структуры, областей разрежения, контактных разрывов, химических реакций (догорание топлива). В работе представлена физико-математическая модель на основе осредненных уравнений Навье-Стокса с адаптированными моделями турбулентной вязкости Ментера с поправками на сжимаемость и моделями турбулентного горения Зельдовича и Магнуссена; показана адекватность моделирования рассматриваемых процессов. Подход состоит в проведении модельных испытаний, валидации численной модели на этих данных и расчете натуральных условий. Расчеты проводились с применением параллельных вычислений на суперкомпьютерах при разностной сетке до 10 млн. ячеек. Валидация численной методики проведена на экспериментальных данных [1–2]. Структура одиночных затопленных струй имеет сложную ударно-волновую структуру. Расчеты показали, что для многоблочных струй данная структура усложняется с появлением дополнительных интерференционных скачков [3]. В целом представленный комплексный расчетно-экспериментальный подход позволяет всесторонне исследовать физико-химические процессы, возникающие при взаимодействиях сверхзвуковых струй с преградами сложной формы для решения проблем газодинамики старта.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 14-08-01149.

### Литература

1. Сафронов А. В., Хотулев В. А. Результаты экспериментальных исследований сверхзвуковых затопленных холодных и горячих струй // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 3(56). С. 15–23.
2. Кудимов Н. Ф., Сафронов А. В., Третьякова О. Н. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с преградой // Труды МАИ: электронный журнал. 2013, № 69.

З. Кудимов Н. Ф., Панасенко А. В., Сафронов А. В., Третьякова О. Н. Исследование многословных турбулентных сверхзвуковых недорасширенных струйных течений // Вестник МАИ. 2013. Т. 20, № 4. С. 179–185.

## ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАСТИН С ЖЕСТКИМИ ТЕЛАМИ

*С. А. Кузнецов, Г. Г. Зиганишина, Э. Р. Лотфуллина, О. В. Старожилова<sup>1</sup>, А. Н. Хусаинова*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

<sup>1</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара

Дана постановка и аналитическое решение контактной задачи для прямоугольной пластины, взаимодействующей с жестким телом в условиях цилиндрического изгиба при несимметричном расположении области контакта. Предполагается, что контакт между пластиной и телом осуществляется только по нормали к поверхности. Задача ставится в рамках линейной теории пластин с учетом поперечного обжатия в зоне контакта  $b \leq x \leq c$ . Проведено систематическое исследование и установлено существенное влияние условий закрепления пластины на распределение контактных напряжений.

Согласно математически корректной постановке контактных задач для тонкостенных элементов конструкций на основе теории Кирхгофа–Лява с учетом местного обжатия условия контакта поверхности тела и пластины записываются в виде интегрального уравнения Фредгольма второго рода

$$k_0 \sigma(x) + \int_b^c G(x, \xi) \sigma(\xi) d\xi = f(x), \quad b \leq x \leq c, \quad (1)$$

где  $k_0$  – коэффициент обжатия,  $\sigma(x)$  – неизвестное контактное давление,  $f(x)$  – функция формы и жесткого смещения тела, функция влияния  $G(x, \xi)$  является прогибом пластинки под действием сосредоточенной силы, приложенной в произвольной точке  $-L < \xi < L$ ,  $L$  – полуширина пластины.

С использованием математического аппарата обобщенных функций построен набор функций влияния для различных граничных условий по краям пластины. Уравнение (1) решено разработанным ранее в Казанском университете методом сведения интегрального уравнения к краевой задаче для вспомогательной функции, связанной с искомым контактным давлением простым дифференциальным соотношением. При этом дифференциальное уравнение новой краевой задачи имеет тот же тип, что и уравнение для построения функции влияния, а краевое условие получается довольно сложным, включающим в себя первые три производные функции влияния и вспомогательной функции.

Получено точное аналитическое решение задачи. Проведены систематические исследования зависимости распределения контактных напряжений от относительных размеров и формы жестких тел и условий закрепления пластины.

Результаты исследования могут быть использованы при верификации алгоритмов и программ численного решения задач контактного взаимодействия.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО И ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ К ДЕКОМПОЗИЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СРЕД

*С. В. Лашкин, А. С. Козелков, В. Ю. Герасимов, Д. К. Зеленский,  
С. Н. Полищук, А. В. Ялозо*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

При моделировании движения твердых частиц в непрерывной среде, возникающих в задачах переноса вулканической пыли, переноса примесей в течении теплоносителей в реакторах АЭС [1–3] и т. д., применяются два подхода: Эйлера–Лагранжев и Эйлера–Эйлеров. Реализация Эйлера–Эйлерова подхода требует введения дополнительных уравнений для твердых частиц, имеющих разные параметры (диаметр, плотность и т. д.), что требует большого количества компьютерных ресурсов и, как следствие, значительного увеличения времени счета. Эйлера–Лагранжев подход лишен этого недостатка и позволяет моделировать частицы с различными параметрами и получать при этом детальную информацию о взаимодействии частиц друг с другом, со стенками, а также с непрерывной фазой. Одним из существенных ограничений данного подхода является его параллельная реализация.

Если рассматривать чистый Лагранжев подход (без учета непрерывной фазы), то его особенности полностью изучены и не представляют особых трудностей в реализации, в том числе и параллельной. Однако при введении непрерывной фазы, включающей использование сеточной модели, появляются существенные сложности в параллельной реализации Эйлера–Лагранжева подхода. Трудность заключается в наличии достаточно больших параллельных массивов, учитывающих взаимодействие частиц между собой и непрерывной средой. На сегодняшний момент не существует идеального способа решения проблемы эффективной параллельной реализации и при моделировании Эйлера–Лагранжевой многофазности применяют два взаимоисключающих подхода: алгебраический и геометрический. Главной особенностью алгебраического подхода является равномерное распределение частиц по счетным процессорам, называемое распределением по времени. Прямо противоположный подход – геометрический, где расчет частицы проводится на том же процессоре, в котором находится ячейка сетки, называют распределением «по месту». Алгоритмы хорошо представлены и описаны только при бессеточном Лагранжевом моделировании дискретных фаз, но в присутствии сетки и с наличием непрерывной среды проблемы применения данных подходов, как показывает изученная литература, практически не исследованы.

В данном докладе рассматриваются вопросы решения задач движения твердых частиц в непрерывной среде – Эйлера–Лагранжев подход. Особое внимание уделено проблеме параллельной реализации алгебраического и геометрического подходов. Проведено сравнение эффективности применения подходов на тестовых задачах, как по общему времени счета задачи, так и по необходимой памяти.

### Литература

1. Costa A., Macedonio G., Folch A. A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. 241. 634–647.
2. Macedonio G., Costa A., Longo A. A computer model for volcanic ashfallout and assessment of subsequent hazard // *Computers & Geosciences*. 2005. 31. 837–845.
3. Молчанов П. А. Моделирование пристеночной плазмы сферического токамака MAST: автореферат диссертации. Санкт-Петербург, 2010.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕННОГО И СОВМЕЩЕННОГО ПОДХОДОВ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ – СТОКСА В ЗАДАЧАХ ГИДРОДИНАМИКИ

*С. В. Лашкин, А. С. Козелков, А. В. Ялозо, Н. В. Тарасова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Эффективность решения большинства задач вычислительной гидродинамики зависит от выбора алгоритма решения системы уравнений Навье – Стокса, который может быть основан на решении полной системы уравнений Навье – Стокса без расщепления или на алгоритме расщепления по физическим процессам, подразумевающим решение отдельного уравнения для давления.

Аспекты выбора того или иного подхода рассмотрены в многочисленных статьях и монографиях, и существенно зависят от физики моделируемого течения, необходимой точности расчета и имеющихся вычислительных ресурсов. Однако всем алгоритмам присуща одна и та же проблема, а именно скорость сходимости зависит от количества ячеек вычислительной сетки. Даже несмотря на успешное решение некоторых проблем, связанных с решателями систем линейных уравнений (введение многосеточных технологий), параллельными вычислениями, геометрической инициализацией и декомпозицией расчетной области, проблемы сходимости все еще решены не полностью. Это касается обоих подходов к дискретизации системы уравнений Навье–Стокса.

Последние успехи в этом направлении связаны с разработкой совмещенного алгоритма, основанного на алгоритме расщепления системы уравнений Навье–Стокса с последующим формированием общей системы алгебраических уравнений [1, 2]. Совмещение уравнений для компонент вектора скорости и давления осуществляется за счет введения неявных слагаемых для градиента давления и массового потока в уравнения сохранения количества движения и неразрывности. Получаемые таким образом неявные коэффициенты суммируются в связанную диагонально-доминантную матрицу. В немногочисленных работах, посвященных разработке и сравнению совмещенного и разделенного алгоритмов, показывается впечатляющая скорость сходимости совмещенного решателя и почти одинаковое время расчета одного контрольного объема, не зависящего от размера сетки, что для разделенного решателя недостижимо. Однако преимущество разделенного решателя показано на простых тестовых задачах и при решении промышленно-ориентированных задач, где определяющим фактором является турбулентность, расчет которой проводится независимо (отщепляется) от скорости и давления, важным становится вопрос о целесообразности применения совмещенного подхода.

В представленной работе исследуется эффективность использования совмещенного алгоритма, основанного на перевязке уравнения сохранения количества движения и неразрывности. Акцент делается на моделировании турбулентных течений с использованием моделей турбулентности, основанных на гипотезе вихревой вязкости. Приводится сравнение на последовательности сгущающихся сеток совмещенного и разделенного алгоритма по общему времени счета задач и общему количеству итераций до сходимости.

### Литература

1. Darwish M., Sraj I., Moukalled F. A coupled finite volume solver for the solution of incompressible flows on unstructured grids // *Journal of Computational Physics*. 2009. 228. P. 180–201.
2. Chen Z. J., Przekwas A. J. A coupled pressure-based computational method for incompressible/compressible flows // *Journal of Computational Physics*. 2010. 229. P. 9150–9165.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ RANS/ILES МЕТОДОМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

*Д. А. Любимов, И. В. Потехина*

Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, г. Москва

Комбинированным RANS/ILES-методом высокого разрешения [1] исследованы сложные турбулентные отрывные дозвуковые и сверхзвуковые течения в диффузорах элементов ТРД. Около стенок течение описывалось методом URANS с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса, вдали от них с помощью ILES. Под ILES подразумевается LES с неявной подсеточной моделью: ее функции выполняет схемная вязкость. Высокое разрешение обеспечивается вычислением параметров в конвективных потоках на гранях ячеек в методе Роу с помощью монотонных разностных схем с разностями против потока 5-го и 9-го порядков аппроксимации. Для вычисления диффузионных потоков – центрально-разностная схема. Расчетный код был распараллелен с помощью технологии OpenMP.

Высокое разрешение метода позволило выполнять расчеты практически значимых задач на узле с 12–24 ядрами. При этом была реализована типичная для инженерной практики технология проведения параметрического исследования объектов по режимным и геометрическим параметрам. Одновременно считалось до 50 вариантов одного объекта на 50 узлах кластера.

Проведены расчеты турбулентных отрывных течений в переходных диффузорах между элементами ТРД. Исследовано влияние геометрических и газодинамических параметров «синтетических» струй, выдуваемых со стенки S-образного прямоугольного диффузора со степенью расширения 2.16 на характеристики турбулентного отрывного течения в нем. Расчеты выполнялись на сетке, содержащей 0.53М ячеек в распараллеленном режиме на 24 ядрах. В ходе расчетов варьировались частота, амплитуда скорости синтетической струи, разность фаз соседних струй, а также геометрия щелей для выдува струй. Показано, что соответствующим подбором режимных параметров синтетических струй, а также геометрии щелей для их выхода характеристики течения на выходе из диффузора могут быть существенно улучшены по сравнению с базовым вариантом: могут быть уменьшены потери полного давления, до полутора раз снижена неравномерность параметров течения, снижен уровень турбулентных пульсаций.

Хорошее совпадение результатов расчета с соответствующими экспериментальными данными дает возможность только численно исследовать различные варианты параметров синтетических струй и щелей для их выхода, оптимизировать их без проведения затратных экспериментов.

Проведено численное исследование возможности управления с помощью синтетических струй отрывным течением в агрессивном переходном диффузоре между ступенями турбины ТРД, длина которого меньше стандартного на 20 %. Расчеты проводились на сетках, содержащих 0.88М ячеек. Параметрическое исследование режимных параметров струй и положения щелей для выхода струй показало, что с помощью синтетических струй можно уменьшить отрыв и получить распределение параметров течения и турбулентности на выходе из диффузора такое же, как в стандартном канале нормальной длины.

Созданная технология позволила провести уникальное численное исследование особенностей течения на нестационарных режимах «зуда» и помпажа в плоском воздухозаборнике (ВЗ) смешанного сжатия с расчетным числом Маха  $M_p = 2$ , геометрия которого близка к описанной в работе [2]. Расчеты проводились на сетках, содержащих 1.7М-1.9М ячеек. Получено хорошее совпадение с экспериментальными данными [2] для этого ВЗ. Была определена граница начала помпажа. Получены дроссельные характеристики с учетом изменения по времени параметров течения на выходе из ВЗ и зависимость коэффициента расхода через систему слива пограничного слоя от степени дросселирования для всех исследованных чисел  $M_0$  набегающего потока. Установлено, что характер колебаний параметров течения на выходе из ВЗ сильно зависит, как от степени дросселирова-

ния, так и от числа  $M_0$  и наличия системы слива пограничного слоя. Расчеты показали, что для исследованного ВЗ на некоторых режимах возможен спорадический помпаж. Получены нестационарные распределения статического давления на стенке канала ВЗ при его различном дросселировании.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00951-а.

### Литература

1. Любимов Д. А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // ТВТ. 2012. Т. 50, № 3. С. 450–466.
2. Trapier S., Duveau P. Deck S. Experimental Study of Supersonic Inlet Buzz // AIAA J. Vol. 44, N 10, 2006. P. 2354–2365.

## ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ СЛОЙ ВЕЩЕСТВА НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ СОУДАРЯЮЩИХСЯ ТЕЛ

*А. Е. Майер, К. В. Хищенко<sup>1</sup>*

Челябинский государственный университет, г. Челябинск

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

В рамках модели идеальной жидкости, значения температуры и энтропии среды претерпевают скачкообразное увеличение во фронте ударной волны, а также на контактной границе между различными материалами после прохождения ударной волны, но остаются неизменными за ударным фронтом вне контактной границы. В реальной конденсированной среде ударно-волновые фронты и переходные области вблизи контактной границы имеют конечную толщину. Из-за этого температурное поле вблизи границ возмущается. В настоящей работе такие возмущения численно анализируются для задачи формирования стационарной ударной волны при динамическом нагружении металлов. Теоретический анализ и вычисления показывают, что в этой задаче вблизи границы возникает высокоэнтропийный слой вещества (с повышенной температурой). Наличие этого слоя следует принимать во внимание при моделировании ударно-волновых процессов в тонких мишенях или в других случаях, когда поверхностные эффекты важны. Например, плавление может происходить в высокоэнтропийном слое на границе между соударяющимися пластинами при интенсивности ударной волны ниже порога плавления в объеме образца. Чтобы получить высокую точность результатов моделирования, следует исключить искусственную вязкость или ее аналоги из численной схемы и использовать физически обоснованные диссипативные процессы (физическую вязкость, пластичность и теплопроводность) для получения устойчивого решения. Такая математическая модель с учетом пластических дислокаций, а также соответствующая численная схема предлагаются.

## КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ВМГ – НАГРУЗКА И НОВАЯ ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЛАЙНЕРА

*А. Р. Майлз*

Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, США

Взрывомагнитные генераторы (ВМГ) являются ценным инструментом для исследования свойств материалов в экстремальных условиях. Моделирование динамических нагрузок при использовании ВМГ в качестве источника энергии обычно осуществляется с помощью моделей электрических цепей или источников тока, которые должны строиться таким образом, чтобы обеспечить их самосогласованность с динамикой генератора. И хотя для получения точных результатов достаточно итерационного процесса моделирования генератора и нагрузки, такой подход может оказаться неудобным при исследовании нагрузок с широким диапазоном динамических характеристик. Благодаря постоянному росту вычислительных возможностей сегодня стало более доступным комплексное моделирование систем «ВМГ – динамическая нагрузка». Этот подход также позволяет сравнивать относительные преимущества различных вариантов ВМГ. В первой части данной работы этот интегрированный подход будет проиллюстрирован примерами, в том числе, расчетами в связи с запланированным совместным экспериментом ВНИИЭФ и ЛАНЛ ALT-3.

Во второй части доклада будет представлена новая тестовая задача 3 по ALT-3 для исследования влияния реальных возмущений поверхности лайнера на его однородность во время имплозии. Будут приведены результаты для двух вариантов этой тестовой задачи с измеренными характеристиками шероховатости поверхности лайнеров в экспериментах R-Damage и PHELIX, проведенных ЛАНЛ. Путем изменения разрешения расчетов был изучен вклад спектрального состава и проведена оценка численной сходимости.

Данная работа была выполнена Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса при поддержке Министерства энергетики США в рамках контракта DE-AC52-07NA27344.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ С ВИХРЯМИ ТЕЙЛОРА

*Ф. А. Максимов*

Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва

В работе приведены результаты моделирования экспериментов, в которых наблюдается образование вихрей Тейлора.

Метод решения задач внешней аэродинамики, разработанный на основе уравнений Навье-Стокса вязкого газа в приближении тонкого слоя [1], применен к расчету течений между вращающимися цилиндрами [2]. При достаточно больших числах Рейнольдса плоское течение Куэтта теряет устойчивость, и течение принимает трехмерный характер. Но учет диссипативных эффектов только по направлению нормали к поверхности тела не позволяет построить устойчивое решение с вихрями Тейлора. Для выхода решения на стационарный режим с вихрями Тейлора необходимо правильно учитывать диссипативные эффекты по направлению оси цилиндров. Для уменьшения области расчета и исключения краевых эффектов было предложено рассматривать только часть течения по длине цилиндров с заданием условия периодичности. Решения с образованием вихрей

Тейлора можно построить в некотором интервале размера периодичности. При задании размера периодичности меньше некоторой величины трехмерная неустойчивость не развивается, и вихри Тейлора не образуются. Это важно для численного моделирования. Задавая размеры ячейки сетки, фактически можно исключить саму возможность появления неустойчивостей. Существует размер периодичности, при котором реализуется максимальный момент трения, и который возможно является наиболее устойчивым, если на течение не оказывают влияние какие-либо факторы, например, размер реального цилиндра или история выхода на режим стационарного течения. Смоделированы эксперименты с разным количеством вихрей при течении между конусами [3]. Метод моделирования применен к широкому кругу геометрий и, в частности, к течению между сферами [4]. Условие периодичности при рассмотрении течений между цилиндрами может иметь место, если ось цилиндров замкнуть по окружности, при этом получается течение между торами. В этом случае, если поверхность внутреннего цилиндра вращается относительно своей оси, то между криволинейными цилиндрами при определенных условиях также образуются вихри Тейлора.

На рис. 1 приведена визуализация течения в виде изоповерхности проекции скорости на «ось» цилиндров. В данном случае образуется 8 пар вихрей Тейлора. Размер вихрей между торами согласуется с оценкой их размеров при течении между цилиндрами.

Приведем пример течения между вращающимися цилиндрами разной температуры. Внешний цилиндр нагрет, а, следовательно, газ около его поверхности имеет меньшую плотность. Из-за действия центробежной силы в системе вращающихся цилиндров будет развиваться неустойчивость Релея–Тейлора. Радиус внешнего цилиндра в два раза больше радиуса  $R$  внутреннего цилиндра, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ . Число Рейнольдса определяется выражением  $Re = \omega R(2R - R)/\nu$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости. Критическое число  $Re$ , при котором течение Куэтта перестраивается в течение с вихрями Тейлора, при неподвижном и не нагретом внешнем цилиндре для данной геометрии составляет приблизительно  $Re^* \approx 70$  [2]. Для образования неустойчивости Релея–Тейлора температура внешнего цилиндра задавалась в два раза выше температуры внутреннего цилиндра. Вращение внешнего цилиндра задавалось таким, чтобы линейная скорость поверхности внешнего цилиндра была равной скорости поверхности внутреннего цилиндра. На рис. 2 приведен тепловой поток  $q$  от внешнего цилиндра к внутреннему цилиндру в зависимости от числа  $Re$ . Значение  $q$  отнесено к перепаду температур и площади поверхности цилиндра с радиусом 1.5. Верхняя кривая соответствует результатам расчетов из состояния с разрывом по плотности, нижняя кривая – из состояния течения, полученного при меньшем числе Рейнольдса. При числе  $Re = 100$  реализуется режим плоского течения Куэтта. При  $Re \leq 300$  постепенное увеличение скорости вращения цилиндров позволяет сохранить течение типа Куэтта (либо сделанное количество шагов интегрирования по времени недостаточно для развития неустойчивостей). При  $Re \geq 400$  решения получаются одинаковыми (близкими по интегральному результату и наблюдаемому характеру течения) независимо от начальных условий. В диапазоне  $200 \leq Re \leq 500$  реализуется режим плоского течения с вихревыми структурами, оси которых параллельны оси цилиндров.

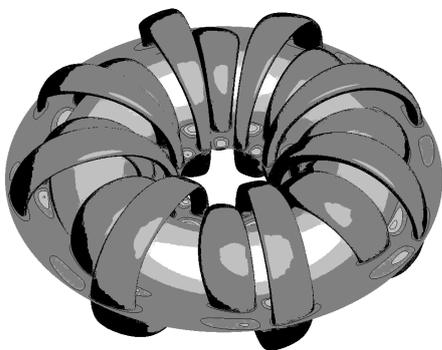


Рис. 1. Вихри Тейлора между торами

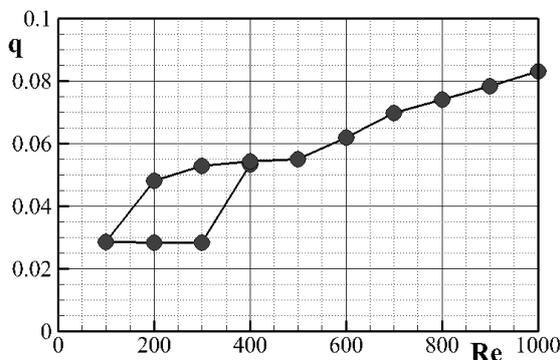
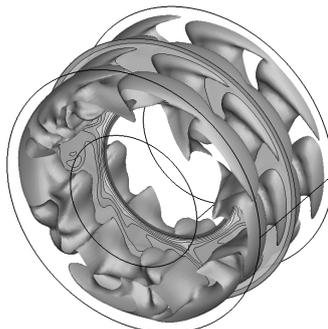
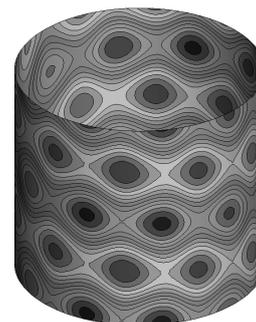


Рис. 2. Тепловой поток в зависимости от  $Re$

Эти вихревые структуры вызваны перепадом температур между цилиндрами и приводят к увеличению теплообмена между цилиндрами почти в 2 раза. На рис. 3 приведены вихревые структуры при  $Re = 400$  в виде распределения плотности в сечении, перпендикулярном оси цилиндров. При увеличении числа  $Re$  больше 500 в течении образуются вихри Тейлора, расположенные вдоль направления движения. Течение принимает трехмерный характер. Результат расчета в виде поверхностей постоянной плотности и скорости вдоль оси цилиндров при  $Re = 700$  приведен на рис. 4. Трехмерный характер течения приводит к интенсификации теплообмена с увеличением теплового потока относительно исходного, реализуемого в течении Куэтта (фактически режима без конвективного теплообмена), при  $Re = 1000$  почти в 3 раза. На рис. 5 приведен характер теплового потока на поверхности внутреннего цилиндра при  $Re = 500$ . С увеличением числа  $Re$  характер теплового потока от переменного в окружном направлении меняется к переменному вдоль оси цилиндров.

Рис. 3.  $Re = 400$ Рис. 4.  $Re = 700$ Рис. 5.  $Re = 500$ 

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01229). Расчеты проводились на МВС-100К МСЦ РАН.

### Литература

1. Maksimov F. A., Churakov D. F., Shevelev Yu. D. Development of mathematical models and numerical methods for aerodynamic design on multiprocessor computers // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2011. Vol. 51, N 2. P. 284–307.
2. Donnelly R. J. Experiments on the stability of viscous flow between rotating cylinders // Proceedings of Royal Society. Ser. A. no 1246. 1958. Vol. 246. P. 312–325.
3. Wimmer M. An experimental investigation of Taylor vortex flow between conical cylinders // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 292. P. 205–227.
4. Wimmer M. Experiments on a viscous fluid flow between concentric rotating spheres // J. Fluid Mech. 1976. Vol. 78. Part 2. P. 317–335.

## МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Л. А. Мерзиевский, М. С. Воронин*

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

При облучении полимеров существенно меняется их структура, что, в свою очередь, приводит к изменениям их физико-механических свойств. Основное влияние ионизирующего излучения на химическую структуру и физические свойства полимеров заключается в том, что при его воздей-

ствии главная цепь полимера может претерпевать разрывы или деструктировать, то есть полимерные молекулы разрываются на более мелкие фрагменты. Кроме того, возможен и процесс сшивания – соединение соседних молекул друг с другом поперечными связями, в результате чего образуются молекулы более крупных размеров. Это открывает возможность целенаправленной модификации свойств полимеров с ионизирующего излучения. В этой связи является актуальным исследование влияния такого воздействия на механические свойства полимерных материалов. В работе (Мержиевский Л. А. и др., 2011)\* были проведены экспериментальные исследования влияния излучения на механические свойства ряда полимеров.

В данной работе построена модель, описывающая изменение механических характеристик облученных образцов. Используется модель вязкоупругого тела максвелловского типа. Для учета влияния ионизирующего излучения на свойства полимеров строятся соответствующие определяющие соотношения, включающие уравнения состояния при нешаровом тензоре деформаций и зависимости для времени релаксации касательных напряжений от параметров, характеризующих состояние среды. Проведены расчеты диаграмм деформирования исходных и облученных образцов. Результаты расчетов хорошо описывают полученные в (см. Мержиевский Л. А. и др., 2011) данные.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 64 и гранта РФФИ № 12-01-00726.

### **3DTRANSVIDIA КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ ПРЕПРОЦЕССОРОВ**

*В. Я. Микушин, И. В. Матвеев*

ООО «ТЕСИС», г. Нижний Новгород

Традиционно источником геометрических данных для САЕ систем служат модели, построенные в САД системах, сохраненные в файлы различных проприетарных (Catia, NX, Creo...) или нейтральных (STEP, IGES, QIF...) форматов. Сами САД системы базируются на разных геометрических ядрах, реализуют различные принципы моделирования и предъявляют отличающиеся требования к качеству геометрии. Все это существенно затрудняет задачу передачи моделей в САЕ системы, которые поддерживают не весь спектр САД элементов одинаково хорошо, что выливается в известные проблемы трансляции данных, зачастую приводящие к потере точности представления или даже к возникновению геометрических искажений.

Платформа 3DTransVidia имеет универсальную функциональность, сочетающую в себе возможности работы с данными различной природы: параметрическими, сеточными и облаками точек. Высокая степень сопряжения с ядрами ведущих САД систем и широта поддерживаемых проприетарных и нейтральных форматов позволяет обеспечить необходимую открытость платформы. неотъемлемой частью 3DTransVidia, обеспечивающей требуемое качество трансляции данных, является развитый функционал по диагностике и автоматическому/мануальному исправлению моделей, не последняя роль в котором отводится инструментам проверки качества на основе критериев, установленных международными стандартами VDA 4955, AIAG D-15, GALIA, ODETTE, JAMA и MIL STD 31000 A. Широкий спектр функций ядра 3D TransVidia реализует как базовый набор инструментов геометрического моделирования, так и множество специальных решений, таких как, работа с большими сборками, распознавание фичеров, упрощение модели, реверс облака точек или триангуляции, сложные алгоритмы поверхностного моделирования и множество других, что позво-

---

\*Мержиевский Л. А., Карпов Е. В., Авсейко Е. О., Коробейников М. В., Штарклев Е. А. Влияние ионизирующего излучения на механические свойства полимеров // Труды V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций [Электронный ресурс]. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011. Электрон. опт. диск, вкладка «Публикации».

ляет использовать 3DTransVidia в качестве независимого препроцессора, обеспечивающего качественный переход от параметрического представления в сеточное. Кроме того, библиотека 3DTransVidia может служить базисом для построения специализированного препроцессора, учитывающего особенности САЕ системы. Успешными примерами подобной интеграции могут служить системы ЛОГОС и FlowVision.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАНДАРТОВ OPENMP И MPI ПРИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА МЕТОДОМ МОНТЕ – КАРЛО**

*А. В. Миронов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Существующая в математическом отделении ИТМФ методика С-007, предназначенная для решения методом Монте–Карло системы спектральных нестационарных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов в трехмерной неподвижной геометрии, имеет определенный недостаток. Так как эта методика распараллелена с использованием стандарта MPI, то при решении задач, геометрические данные которых занимают слишком большой объем, возникает нехватка оперативной памяти вследствие избыточного копирования этих данных для каждого MPI процесса на узле многопроцессорного вычислительного комплекса (МВК).

Решением проблемы может служить либо реализация геометрической декомпозиции данных, либо распараллеливание методики, исходя из концепции общей памяти, в частности, применение стандарта OpenMP. Немногочисленные реализации первого подхода являются малоэффективными, поэтому для решения проблемы был выбран второй подход.

В докладе описываются общая схема процедур методики С-007 и внесенные в них изменения, реализующие смешанное распараллеливание на системе с общей и разделенной памятью. Также в докладе описывается влияние некоторых конструкций кода на быстродействие программы. Особое внимание уделено модульным переменным и их использованию вместе с OpenMP-директивой `threadprivate` в качестве параметров подпрограмм.

Кроме того, в докладе представлены результаты сравнительных тестовых расчетов новой и старой программ. Эти тесты показывают, что новая программа, обладая на порядок лучшим использованием оперативной памяти (до 16 раз), уступает в производительности своей предшественнице в среднем лишь на 10 %.

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ БОЛЬШИХ И СВЕРХБОЛЬШИХ ОБЪЕМНЫХ ДАННЫХ**

*И. О. Михайлов, В. Л. Авербух*

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Методы визуализации больших объемных данных активно развиваются, в том числе благодаря новым аппаратным средствам. В данной работе рассматриваются различные подходы к визуализации

зации объемных данных как с программной, так и с аппаратной стороны, актуальные на сегодняшний день.

В настоящее время наблюдается тенденция использования для трудоемких вычислений ресурсов видеокарты, как правило, для этого используются технологии, позволяющие производить универсальные вычисления на видеокарте. Однако для задач визуализации в некоторых случаях возможно использование шейдеров, являющихся более распространенной и доступной технологией. В работе произведено сравнение технологий GPGPU (CUDA, OpenCL и других) и шейдеров (HLSL, GLSL). Также рассматривается специфика представления объемных данных в памяти видеокарты и вытекающие из этого особенности и ограничения, распределение задачи визуализации между GPU и CPU, преимущества и сложности данного подхода. Так как существующие аппаратные средства позволяют достичь значительной производительности, при базовом подходе бросания лучей (raycasting), были разработаны новые и адаптированы существующие методы, позволяющие повысить качество и реалистичность итогового изображения. К таким методам относятся, в частности, построение дополнительных лучей в неоднородных областях (мультисэмплинг) и уменьшение шага луча с целью снижения шума.

Также для повышения детализации и качества финального изображения используются предобработка и постобработка. Проводится предварительное вычисление нормалей к изоповерхности объемных данных для построения реалистичного освещения. Для динамического освещения используется метод бросания лучей к источнику света, после построения базового изображения объекта. Так возможно применение постэффектов, которые используются в традиционной полигональной компьютерной графике, таких как динамический диапазон яркости (High Dynamic Range) и глубина резкости (Depth of field).

Для компактного представления данных в памяти и трассировки лучей используются октодеревья и kd-деревья. В работе рассматриваются некоторые их модификации, позволяющие повысить эффективность использования данных структур. Одним из вариантов такой модификации являются окто-деревья и kd-деревья с ранней остановкой ветвления, в данных деревьях большинство листьев представляют собой не отдельные воксели, а плотные 3-мерные массивы вокселей. Таким образом, можно достичь выигрыша как по быстродействию, так и по памяти. За счет комбинированного использования деревьев и облака точек обеспечивается эффективное хранение данных в памяти. При этом одиночные воксели хранятся в облаке точек, а плотные группы вокселей – в дереве, благодаря чему достигается плотная упаковка данных. При работе с объемными данными часто возникает необходимость разбиения данных как в памяти одного компьютера, так и в распределенной системе. Проанализированы различные критерии разбиения данных, подходы к обработке границы между областями данных. Также рассмотрены способы представления и визуализации регулярных некубических сеток и других структур, актуальных для задач кристаллографии.

## **ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПИ: КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

*К. Л. Михайлюков, И. В. Храмов, А. В. Скобеев, С. В. Потапов,  
Н. В. Фролова, М. Д. Романова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Метод протонной радиографии с использованием магнитных линз, впервые появившийся с Лос-Аламосе в середине 90-х годов прошлого века и применяемый ВНИИЭФ с 2005 года на ускорителе У-70 в Протвино, зарекомендовал себя качественным инструментом по исследованию газо-

динамических процессов с высоким пространственным разрешением. Данный метод обладает серьезными преимуществами перед рентгеновской радиографией: многокадровость, высокая проникающая способность, и, как следствие, большое поле обзора.

В настоящее время в ИФВЭ (Протвино) ведется интенсивное строительство полномасштабного протонографического комплекса ПРГК-100 с диаметром поля обзора 220 мм и энергией протонов 70 ГэВ. На 2014 год намечен физический пуск комплекса. Ведутся исследования по построению на базе ускорителя У-70 протонной установки, работающей с увеличением (протонный микроскоп). Поэтому остро встает вопрос о математическом обеспечении и сопровождении данных установок.

В этой связи, начиная с 2009 года, в ИТМФ ведутся работы по созданию программного комплекса по моделированию протонных изображений различных объектов как статических, так и динамических, полученных в результате газодинамических расчетов.

В рамках комплекса параллельно создаются две программы по получению протонных изображений, основанные на методе лучевых сумм и методе Монте-Карло, соответственно. Метод Монте-Карло базируется на программе GEANT4 – пакете программ для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло.

В докладе дается представление о текущей версии программного комплекса ПИ (Протонные Изображения), создаваемого для математического моделирования процесса прохождения пучка протонов через 2D- и 3D-объекты и расчета протонных изображений объектов. Дано краткое описание используемых алгоритмов и функций. Представлены расчетные изображения.

## **РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IOSO PM И КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ**

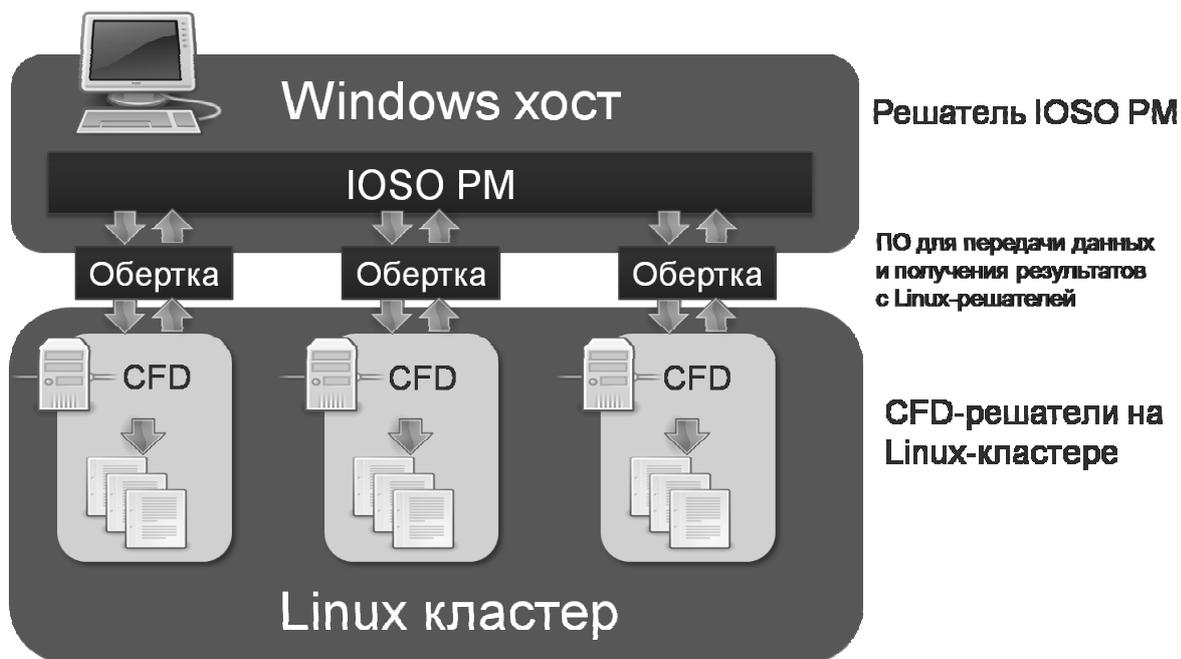
*И. В. Михеев, А. Ю. Маралев, Е. А. Губкина*

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

В настоящее время все большую актуальность приобретает задача оптимизации параметров отдельных узлов и всего ГТД в целом с помощью комплексов многокритериальной оптимизации. Программный комплекс IOSO PM позволяет ускорить процесс поиска оптимального решения посредством распараллеливания оптимизации (максимум на 32 потока).

Одним из путей сокращения времени решения трехмерных задач газовой динамики и прочности является использование систем с распределенной памятью (кластеров).

Таким образом, имея в распоряжении кластерный комплекс и программный продукт IOSO PM можно значительно сократить временные затраты на решение задач оптимизации. Общая схема взаимодействия программных комплексов показана на рисунке.



Распараллеливание процесса оптимизации

### Литература

1. Kuzmenko M. L., Egorov I. N., Shmotin Yu. N., Chupin P. V., Fedechkin K. S. Multistage axial flow compressor optimization using 3D CFD code // 6<sup>th</sup> ASMO UK/ISSMO conference on engineering design optimization, Oxford, UK, 3–4 July, 2006.
2. Kuzmenko M. L., Egorov I. N., Shmotin Yu. N., Fedechkin K. S. Optimization of the gas turbine engine parts using method of the numerical optimization // Conference ASME TURBO EXPO 2007.

### ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО РЕЖИМА ПОДГОТОВКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ БАЗЫ ДАННЫХ POSTGRESQL

*А. Г. Надуев, А. Д. Черевань, Д. А. Кожяев*

ООО «Центр компетенций и обучения», г. Саров

Одним из важных требований при разработке современных комплексов математического моделирования является организация многопользовательского режима разработки сценария расчетной задачи, при котором неограниченное количество пользователей, используя один из компонентов программного комплекса – препостпроцессор, имеет возможности одновременно:

- редактировать существующие объекты сценария;
- создавать новые объекты сценария;
- удалять устаревшие объекты сценария.

В ходе разработки сценария расчетной задачи ведется история всех изменений – создаются новые версии одного и того же сценария с возможностью возврата, при необходимости, к одной из предыдущих версий, при этом возникает необходимость улаживать конфликты версий сценария разрабатываемых различными пользователями.

Для реализации подобного многопользовательского режима необходимо:

- определить общее доступное удаленно хранилище всех версий разрабатываемого сценария расчетной задачи;
- предоставить абстрактный интерфейс хранения контекста любого объекта сценария для сохранения всех объектов с использованием единого подхода;
- определить возможность уникальной идентификации всех объектов сценария для использования сквозной нумерации/идентификации объектов как в препостпроцессоре, так и в контейнере хранения;
- предоставить единый интерфейс сохранения новых версий одного сценария и общий интерфейс улаживания конфликтов версий одного и того же сценария, созданных различными пользователями.

В качестве общего хранилища всех версий разрабатываемого сценария была выбрана современная, свободная объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, которая по своим характеристикам полностью подходит для реализации подобного многопользовательского режима.

Для реализации абстрактного интерфейса хранения контекста любого объекта данных был выбран расширяемый язык разметки XML, который позволяет сериализовать/десериализовать объекты сценария с любой глубиной вложенности в единое поле типа xml, поддерживаемое СУБД PostgreSQL.

Уникальным идентификатором всех объектов, позволяющим однозначным образом определять объекты сценария как в препостпроцессоре, так в СУБД, является целочисленное значение SysId, выдаваемое препостпроцессором каждому новому объекту, созданному в процессе разработки сценария, при этом постоянно осуществляется контроль идентификаторов объектов, уже попавших в общее хранилище, и идентификаторов объектов, существующих еще только локально. То есть речь идет о некотором пороговом значении (threshold), которое разделяет идентификаторы объектов на «глобальные», которые уже находятся в СУБД и ни при каких условиях не могут быть изменены, и «локальные» – идентификаторы объектов, которые могут быть перенумерованы при попадании в СУБД.

За основу разработки единого интерфейса работы с СУБД, предоставляющего возможности сохранения нескольких версий одного и того же сценария расчетной задачи, возврата к одной из более ранних версий и улаживания возникающий конфликтов версий сценария различных пользователей, был выбран аналогичный интерфейс распределенной системы контроля версий Mercurial.

Данная система многопользовательского режима, основанная на базе СУБД PostgreSQL с возможностью сохранения нескольких версий одного и того же сценария расчетной задачи, была использована при разработке программно-аппаратного комплекса (ЭО ПАК).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ CFD-КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

*В. Р. Низамутдинов, С. Л. Осипов, И. С. Прокопцов, С. А. Рогожкин*

Опытное конструкторское бюро машиностроения  
им. И. И. Африкантова, г. Нижний Новгород

В моделях турбулентности, реализованных в большинстве CFD-кодах (ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision, Fluent и др.), для учета теплопереноса используется аналогия Рейнольдса – аналогия между теплообменом и переносом количества движения в турбулентном потоке. В жидких металлах вследствие большой теплопроводности и малой вязкости, распределение полей скорости и температуры существенно различаются друг от друга. Таким образом, теплоперенос в средах с  $Pr \ll 1$  (жидкие металлы) существенно отличается от механизма теплопереноса в средах с  $Pr \sim 1$  (воздух, вода), и использование моделей турбулентности с аналогией Рейнольдса для моделирования теплогидравлических процессов с натриевым теплоносителем может привести к некорректным результатам.

Для учета специфики теплопереноса в натриевом теплоносителе в отечественном CFD-программном комплексе FlowVision реализована модель турбулентного теплопереноса LMS (Liquid Metals (Sodium)) [1, 2]. Эта модель включает в себя уравнения теплопереноса в турбулентном потоке, выражение для турбулентного числа Прандтля, поправку, учитывающую гравитационную анизотропию в тепловом потоке, тепловую пристеночную функцию.

В данной работе представлены результаты расчетного исследования течения натрия в круглой трубе с помощью коммерческих CFD-кодов: ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision (с моделью и без модели LMS). В задаче рассматривается развитое турбулентное течение жидкометаллического теплоносителя с температурой на входе в трубу  $T_{вх} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$  и поддержанием наружной стенки трубы при постоянной температуре ( $t_c = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В результате решения определяется средняя температура теплоносителя на выходе из трубы при варьировании критерия Пекле ( $Pe$ ) от 300 до 10000 в соответствии с областью применения формулы для расчета критерия Нуссельта  $Nu = 5 + 0,025 \cdot Pe^{0,8}$  [3], используемой в аналитическом решении.

На рисунке представлены зависимости погрешности средней температуры на выходе из трубы, полученные с помощью CFD-кодов, от критерия Пекле при сравнении с аналитическим реше-

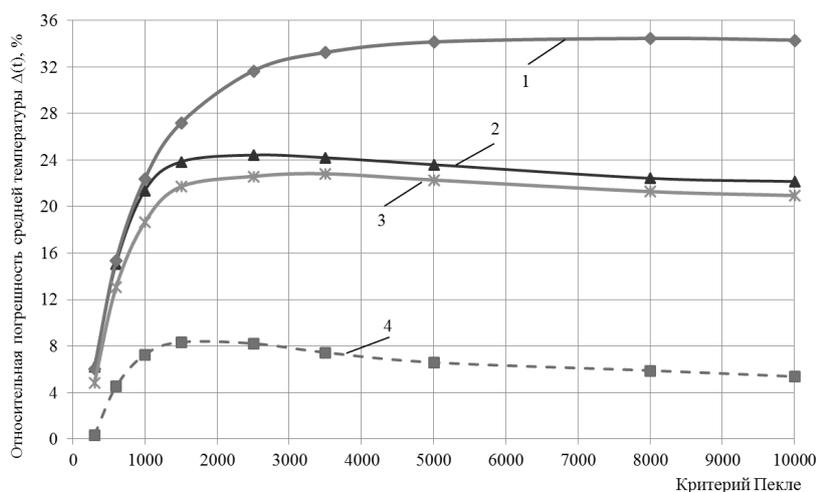


Рис. 1. Погрешность расчета средней температуры на выходе из трубы: 1 – ANSYS CFX, 2 – FlowVision, 3 – STAR-CCM+, 4 – FlowVision с LMS

нием. Как видно из приведенных графиков, использование CFD-кодов ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision (без LMS) приводит к большим погрешностям (до 34 %), применение модели турбулентного теплопереноса LMS в FlowVision позволяет существенно улучшить результаты расчетов для данного класса задач и достичь погрешности расчета не более 8 %.

### Литература

1. Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Фадеев И. Д. и др. Разработка модели LMS для учета турбулентного теплопереноса в натриевом теплоносителе и ее тестирование // Международный форум «Инженерные системы-2012»: Тез. докл. 2012. С. 21–22.
2. Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Соболев В. А., Шепелев С. Ф., Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Сазонова М. Л., Шмелев В. В. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 5. С. 295–298.
3. Боришанский В. М. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967.

## БИБЛИОТЕКА ЕФР КАК СРЕДСТВО ЭФФЕКТИВНОГО ДОСТУПА К ФАЙЛОВЫМ ДАННЫМ НА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

*К. К. Олесницкая, И. А. Антипин, М. А. Петрова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Освоение и эффективное использование вычислительных и файловых ресурсов многопроцессорных ЭВМ на базе перспективной архитектуры, является одной из актуальных задач в математическом отделении ВНИИЭФ. Поэтому в рамках создания базового программного обеспечения, необходимого для проведения комплексного имитационного моделирования задач основной тематики и инженерных задач различных отраслей промышленности на многопроцессорных ЭВМ реализована библиотека ЕФР\*. Проблемно-ориентированная библиотека обеспечивает оперативный и эффективный масштабируемый доступ к файловым данным на многопроцессорных ЭВМ.

Библиотека используется в основных прикладных программных комплексах ВНИИЭФ, является составной частью программ общего сервиса (препроцессор, постпроцессор) и является неотъемлемым компонентом технологии проведения расчетов на вычислительных системах (ВС) ВНИИЭФ.

Библиотека ЕФР предоставляет единый функциональный интерфейс для работы с файловыми данными и единый формат представления расчетных данных, который позволяет сохранять все необходимые данные как для продолжения счета в рамках одного комплекса программ, так и для передачи в другой комплекс программ для полномасштабных последовательных расчетов.

Программы чтения-записи расчетных данных, реализованные средствами библиотеки ЕФР, легко портируются между несовместимыми аппаратными платформами. Это достигается благодаря тому, что библиотека ЕФР при решении задач доступа к файловым данным использует реализацию с учетом стратегии оптимального использования аппаратных и файловых ресурсов конкретной ВС.

---

\*Олесницкая К. К., Антипин И. А., Шубина М. А. Библиотека ЕФР для масштабируемого доступа к файловым данным на многопроцессорных ЭВМ // XI Забавихинские научные чтения: Сборник тезисов. Снежинск, 16–20 апреля, 2012. С. 335–336.

## EFR-TOOLS КАК СРЕДСТВО МОДИФИКАЦИИ, ВЕРИФИКАЦИИ И ВАЛИДАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ ЕДИНОГО ФАЙЛОВОГО РАЗРЕЗА

*К. К. Олесницкая, И. А. Антипин, М. А. Петрова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В математическом отделении ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ для сохранения расчетных данных в файлы (разрезы), при численном моделировании задач математической физики, по прикладным программным комплексам (ППК) в качестве основного инструмента используется библиотека ЕФР [1]. С ее помощью данные сохраняются в единый файловый разрез (ЕФР) в виде бинарных файлов унифицированного формата. Неотъемлемым компонентом библиотеки является кроссплатформенная программа EFR-Tools [2], основной задачей которой является ускорение и упрощение процесса внедрения возможностей библиотеки ЕФР в ППК.

Программа EFR-Tools имеет удобный графический интерфейс, предназначенный для просмотра, редактирования, анализа и обработки большого объема данных (более 10 миллиардов счетных узлов) единого файлового разреза.

Для разработчиков ППК EFR-Tools предоставляет ряд вспомогательных средств для отладки собственных программных комплексов и для решения проблем, связанных с постобработкой данных ЕФР программами общего сервиса. К таким средствам относятся:

- средства создания базовых (тестовых) разрезов;
- средства модификации и коррекции разрезов;
- средства компоновки разрезов;
- средства верификации разрезов, такие как:
  - физическое сравнение данных разрезов;
  - логическое сравнение данных разрезов;
- средства валидации разрезов, такие как:
  - проверка внутренней структуры разреза;
  - проверка данных на недопустимые значения;
  - проверка на соответствие форматам;
  - проверка распределенных данных.

Разработчики ППК могут самостоятельно расширять функциональность программы необходимыми специфическими возможностями благодаря тому, что в EFR-Tools поддерживается интерактивная работа с плагинами и реализованы средства для их создания.

Для разработчиков библиотеки ЕФР программа предоставляет средства, которые позволяют в кратчайшие сроки восстанавливать «битые» разрезы.

В докладе описываются функциональные возможности программы EFR-Tools версии 1.3.0, которая создана на базе библиотеки ЕФР версии 3.1.2.

### Литература

1. Олесницкая К. К., Антипин И. А., Шубина М. А. Библиотека ЕФР для масштабируемого доступа к файловым данным на многопроцессорных ЭВМ // XI Забабахинские научные чтения: сб. тез. Снежинск, 16–20 апреля, 2012. С. 335–336.

2. Олесницкая К. К., Антипин И. А., Шубина М. А. Визуальная система тестирования библиотеки EFR. Диагностика и коррекция EFR-разрезов // X научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сб. докл. Саров, 1–3 ноября, 2012. С. 34–39.

## МОДУЛЯРНО-СИСТОЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО-КОНВЕЙЕРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*И. П. Осинин, В. С. Князьков, Т. В. Князькова*

Вятский государственный университет, г. Киров

В статье представлены результаты экспериментальной апробации разработанных авторами динамически реконфигурируемых конвейерных вычислительных структур в базисах модулярной арифметики: оперативно масштабируемых, поддерживающих высокую скорость вычислений за счет новых алгоритмических и структурных решений, минимизированных по аппаратным ресурсам и обеспечивающих высокую технологичность при их массовом производстве.

Выполнение арифметических операций в предложенных устройствах, построенных на базе системы остаточных классов, выгодно отличается от своих позиционных аналогов. При этом показано, что максимальное распараллеливание арифметических операций возможно при параллельно-конвейерном режиме обработки данных с помощью однородной вычислительной среды [1].

В этом случае скорость выполнения таких арифметических операций, как сложение, вычитание, умножение и деление нацело не зависит от разрядности операндов и сводится к времени срабатывания ячейки однородной вычислительной среды.

В результате оценки эффективности предлагаемого арифметического устройства установлено, что при одинаковых аппаратных затратах скорость вычислений в системе остаточных классов (СОК) после заполнения  $m + 1$  ступеней конвейера будет в  $n/(m + 1)$  раз выше для операций сложения и вычитания и в  $n^2/(m + 1)$  раз выше для операций умножения и деления по сравнению с ПСС, где  $n$  – разрядность операндов,  $m$  – разрядность оснований СОК [2].

Так, например, скорость суммирования двух 64-разрядных чисел в предлагаемом процессоре в 7,11 раз выше при выполнении операции в СОК по сравнению с позиционной системой счисления. Аналогично, скорость умножения двух 64-разрядных чисел в 455,11 раз выше при выполнении операции в СОК.

### Литература

1. Осинин И. П., Князьков В. С. Модулярно-систолический процессор с реконфигурируемой микроархитектурой: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012610583 от 10.01.12
2. Осинин И. П., Князьков В. С. Однородная модулярно-систолическая структура для массовых арифметических вычислений // IV Международная научная конференция «Суперкомпьютерные системы и их применение (SSA-2012)»: сб. мат. Минск, 2012. С. 122–126.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЛОГОС ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ГИЛЬЗ В ТРАКТЕ ГИЛЬЗОТВОДА И ПРИ ОТДЕЛЕНИИ ОТ НОСИТЕЛЯ

*Д. А. Останко, В. А. Чагина, Э. А. Дугаров*

Филиал ОАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», г. Москва

Современные фронтальные истребители оснащаются высокоскоростными авиационными пушечными установками (АПУ). Их безопасное применение должно быть обеспечено на всех режимах полета.

После выстрела АПУ необходимо отводить отработанные («стреляные») гильзы. Основными требованиями, предъявляемыми к системе отвода гильз, является их надежное перемещение по тракту гильзоотвода и безопасный выброс за обводы летательного аппарата (ЛА).

Применяемые АПУ обладают системой продольного выхода гильзы, что обеспечивает большую скорость и стабильное положение в гильзоотводе, но значительные механические нагрузки приводят к сильному износу конструкции. При движении гильзы в тракте происходит потеря кинетической энергии в связи с многократными соударениями, что влечет за собой снижение скорости гильзы на выходе из гильзоотвода, а на определенных углах атаки, числа Маха и при выполнении сложных маневров существует вероятность попадания гильз в ЛА. Экспериментальные исследования посредством летных испытаний весьма дорогостоящие, не охватывают все возможные случаи, могут привести к потере человеческой жизни и машины. Необходима новая методика определения степени применимости АПУ.

До настоящего момента численное моделирование динамики движения гильз проводилось в сильно упрощенной постановке без учета формы гильзы и воздействия воздушного потока. Движение гильз по тракту гильзоотвода исследовалось на стендах экспериментально.

Геометрическая модель системы отвода гильз состоит из тракта гильзоотвода, деталей крепежа и гильзы от снаряда калибра 30 мм в момент выброса из АПУ. Область обтекания представляет собой полусферу с геометрией фронтового истребителя и гильзы в точке выхода из гильзоотвода.

Задача является сопряженной и поэтому состоит из двух этапов: первый – численное моделирование динамики движения гильзы по тракту гильзоотвода (динамическая прочность) – необходимо определить составляющие линейных и угловых скоростей на выходе из гильзоотвода для последующего использования в аэродинамическом расчете; второй – численное моделирование динамики отделения гильзы от носителя (нестационарная аэродинамика) – необходимо получить траекторию движения гильзы относительно обводов ЛА. Для каждого из этапов проводилась валидация на упрощенных моделях с целью определения оптимальных размерностей дискретных моделей и параметров решателя.

Для прочностного расчета дискретная модель построена средствами ПК ЛОГОС и представляет собой блочно-структурированную гексагональную сетку. Расчетная сетка области обтекания представляет собой две взаимно интегрированные («химера») неструктурированные гексагональные отсечные сетки с призматическими слоями.

Проведено моделирование нескольких расчетных случаев с различными вариантами закрепления, размерности расчетной сетки, коэффициента трения и перегрузок. Выполнено сравнение результатов ПК ЛОГОС с коммерческим аналогом в одинаковых постановках и настройках.

Анализ результатов первого этапа позволяет сделать вывод о сильном влиянии удара на поверхность гильзоотвода, значительных его пластических деформациях, в том числе остаточных, что необходимо учитывать при конструкторской проработке изделия. Скорость гильзы в тракте значительно снижается с ростом коэффициента трения, но не достигает критической величины, полученной экспериментально для данного ЛА. Влияние перегрузок на движение гильзы в тракте минимально и может не учитываться.

Результаты второго этапа показывают значительное влияние на траекторию отделения гильзы начальных кинематических параметров и аэродинамических сил, поэтому при проектировании ЛА необходимо проводить серию сопряженных расчетов для выявления наиболее опасных условий применения АПУ. Также возможно сократить число летных и стендовых испытаний.

## Литература

1. Сушков С. А., Струцкий В. Г., Данеко А. И., Полковников В. А., Тимашев И. В. Авиационные артиллерийские установки. Конструкция и проектирование. М.: Изд-во МАИ, 1998.
2. Штайншнайдер А. Э. Исследование условий отражения гильз при стрельбе из автоматических авиационных пушек и методов повышения стабильности движения отраженных гильз в гильзоотводах и в воздушном потоке: дис... канд. техн. наук. Москва, 1980.

3. Пакет программ Логос – Аэрогидромеханика: техническое руководство. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ ИТМФ, 2013.

4. Пакет программ Логос – Прочность: техническое руководство. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ ИТМФ, 2013.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОПАТОЧНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*К. В. Отряхина, С. А. Ковалев, К. Р. Пятунин, И. В. Михеев,  
К. А. Виноградов, Р. А. Диденко*

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Увеличение требований к экономичности, массе и долговечности авиационных двигателей заставляет производителей искать оптимальное сочетание данных параметров, многократно пересматривая различные варианты конструкции и сочетания различных факторов, влияющих на искомый результат. В связи с этим становится актуальным внедрение методик и программ многокритериальной параметрической оптимизации на всех стадиях разработки современного ГТД.

В данной работе представлен опыт разработки способов и методик оптимизации газодинамических параметров и их сочетаний, применяемых в ОАО «НПО «Сатурн» при проектировании лопаточных машин. На начальном этапе применялись методы однокритериальной оптимизации газодинамических параметров на основе одномерных и двухмерных расчетных методик.

Рост вычислительных ресурсов привел к самой возможности создания полноценной методики оптимизации элементов проточной части в 3D постановке, что в десятки раз увеличило затраты времени. Выход из положения был найден путем распараллеленного запуска нескольких расчетных точек задачи оптимизации. В среднем для большинства методик оптимизации, базирующихся на пространственном расчете течения газа или расчета напряженно-деформированного состояния детали, время счета уменьшилось с 14–20 дней до 24 часов.

В работе представлены результаты разработки параметрической модели многокритериальной распараллеленной оптимизации ступени КНД гражданского авиационного двигателя с использованием кластерных вычислительных ресурсов.

Была поставлена следующая задача оптимизации: максимизация КПД ступени при сохранении/повышении запасов ГДУ. Варьируемыми параметрами являлись входной и выходной углы средней линии профиля в нескольких сечениях.

Алгоритм оптимального профилирования был построен на основе оптимизатора IOSO NM (PM) с использованием ANSYS CFX в качестве газодинамического решателя. Для автоматизации создания параметрической модели лопаточных венцов использовалась программная среда NUMECA/FineDesign (NUMECA/AutoBlade и NUMECA/AutoGrid).

Задача оптимизации решалась в параллельном режиме с одновременным расчетом характеристик 32 вариантов геометрии ступени. При этом газодинамические расчеты также выполнялись в параллельном режиме.

В результате оптимизации было получено множество решений, неуплучшаемых по всей совокупности показателей эффективности, (множество Парето) между адиабатическим КПД ступени и запасами ГДУ (рис. 1).

Из множества Парето был выбран оптимальный вариант, обеспечивающий повышение адиабатического КПД на 1,9 % при сохранении исходных запасов ГДУ.

Сравнение исходного и оптимального вариантов геометрии ступени КНД приведено на рис. 2.

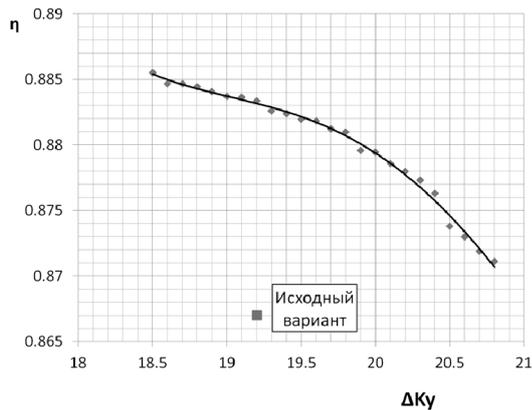


Рис. 1. Множество Парето

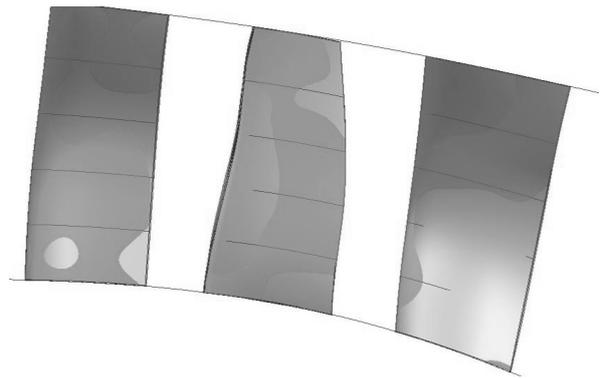


Рис. 2. Сравнение исходного и оптимального вариантов геометрии

Возможность одновременного получения ряда оптимальных параметров лопаточной машины (например, КПД и запас газодинамической устойчивости компрессора) позволяет без значительных затрат по времени выбрать из заранее просчитанного поля интересующий вариант геометрии детали.

### Литература

1. Kuzmenko M. L., Egorov I. N., Shmotin Yu. N., Chupin P. V., Fedechkin K. S. Multistage axial flow compressor optimization using 3D CFD code // 6thASMO UK/ISSMO conference on engineering design optimization, OXFORD, UK, 3–4 July, 2006.
2. Kuzmenko M. L., Egorov I. N., Shmotin Yu. N., Fedechkin K. S. Optimization of the gas turbine engine parts using method of the numerical optimization // Conference ASME TURBO EXPO 2007.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕТА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА (ЛА)

*В. М. Понятский, И. В. Кислинский*

Конструкторское бюро приборостроения, г. Тула

Актуальность использования средств компьютерного моделирования в том, что такой подход уменьшает время и расходы на производство образца еще на этапе проектирования, позволяет сократить количество экспериментов и экономить на производстве образца летательного аппарата.

В среде Matlab создана система моделей движения ЛА:

- линеаризованная модель, созданная блоками из библиотеки модулей Simulink;
- нелинейные математические модели, реализованные как с помощью стандартных блоков Aerospace, так и с использованием блоков SimMechanics.

Модель с использованием стандартных блоков *Simulink* реализует дифференциальные уравнения линеаризованной модели. В модели движения летательный аппарат рассматривается, как материальная точка.

Библиотека *Aerospace* содержит блоки, позволяющие моделировать ЛА и его полет в воздушной среде. В библиотеке имеются стандартные блоки ЛА, описывающие его движение в плоскости

или в пространстве. Моделирование воздействия воздушной среды и тяги двигателя требует формирования и приложения соответствующих сил и моментов к центру масс модели ЛА (рис. 1,а).

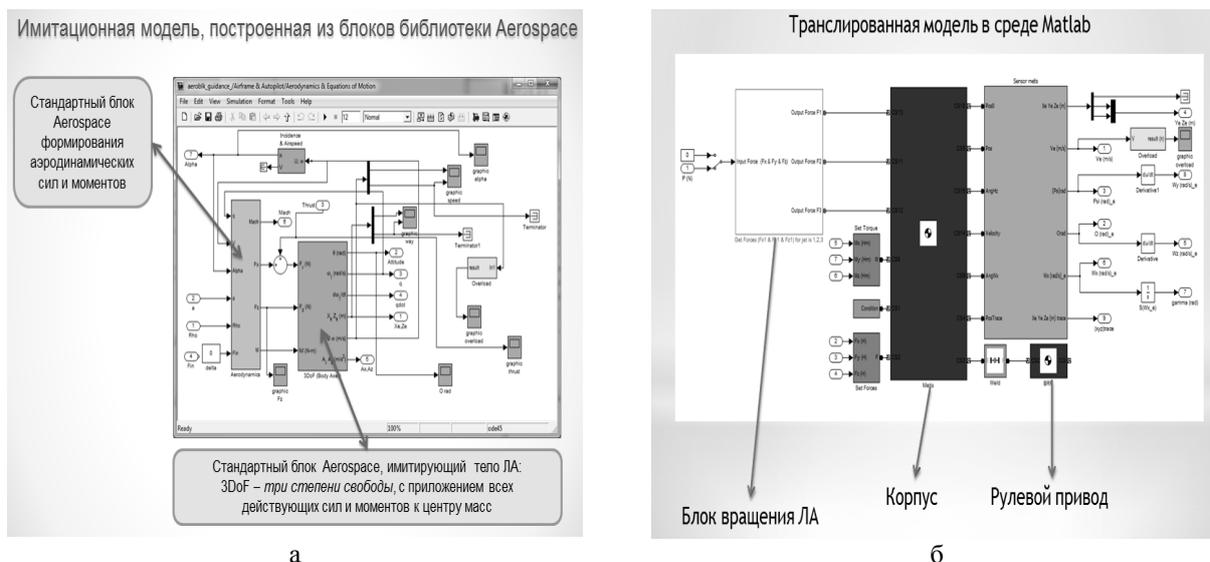


Рис. 1. Модель ЛА в среде Matlab

Для реализации в модели ЛА возможности приложения сил и моментов в тех точках, где они действуют, вместо стандартных блоков *Aerospace* вводятся блоки *SimMechanics*, которые описывают массу и моменты инерции физического тела, координаты центра масс в указанной системе координат, а также их степени свободы (рис. 1,б). Блоки *SimMechanics* могут быть получены путем трансляции 3D-модели из *SolidWorks*. Для описания воздействия силы тяги двигателя используются исходные табличные данные, которые интерполируются средствами Matlab. Для описания воздействия на ЛА аэродинамических сил и моментов средствами Matlab вводятся блоки, реализующие формулы расчета:  $X = c_x q S$ ,  $x = c_x q S$ ,  $x = c_x q S$ ,  $M_x = m_x q S l$ ,  $M_y = m_y q S l$ ,  $M_z = m_z q S l$ . Аэродинамические коэффициенты рассчитываются в программе *SolidWorks* с помощью модуля *FlowSimulation*. Такая модель ЛА описывает приложение силовых воздействий в точку с определенными координатами, что позволяет перейти от модели материальной точки к пространственной модели. Для решения уравнений движения физического тела под воздействием приложенных сил в среде Matlab *Simulink* имеются так называемые решатели систем дифференциальных уравнений. Эти решатели можно настраивать, чтобы интегрирование проводилось как с фиксированным шагом, так и с автоматическим определением шага интегрирования.

Предлагаемый подход позволяет специалистам конструкторских подразделений получать оценки баллистических характеристик разработанной конструкции ЛА еще до его изготовления и испытания.

Таким образом, полученная система моделей позволяет как проводить оперативную оценку динамики полета ЛА, используя линеаризованную модель или модель из стандартных блоков *Aerospace*, так и более глубокое компьютерное моделирование конструкторской 3D-модели с использованием блоков *SimMechanics*, что позволяет сократить временные и материальные затраты на проектирование образца ЛА.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

*Т. В. Попова, А. Е. Майер, К. В. Хищенко<sup>1</sup>*

Челябинский государственный университет, г. Челябинск  
<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

На основе моделей вязкоупругих сред Максвелла и Фойгта проводится численное моделирование высокоскоростного соударения плоских пластин из полиметилметакрилата. Рассчитаны профили скорости тыльной поверхности и скорость ударной волны при разных скоростях соударения. Представлены результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными. Модель Максвелла с постоянным временем релаксации позволяет описать структуру фронта ударной волны лучше модели Фойгта, волна разрежения описывается существенно хуже обеими моделями. Учет вязкоупругих свойств материала позволяет лучше описать экспериментальную зависимость скорости ударной волны от массовой скорости в области малых интенсивностей соударения.

## ЯЗЫКОВОЙ СЕРВИС FRIS ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАЗРАБОТКИ FORTRAN-ПРИЛОЖЕНИЙ

*И. С. Раткевич, Ю. Г. Бартенев, С. С. Касаткин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Сегодня для большинства языков программирования существует множество интегрированных сред разработки, которые позволяют решать самые разнообразные задачи: начиная от написания текста, как правило, с использованием технологии быстрой разработки приложений (Rapid Application Development – RAD), и заканчивая отладкой и автоматическим тестированием полученного приложения.

Для программирования в операционной системе Windows, наиболее распространенной и часто используемой средой разработки является Microsoft Visual Studio. Она поставляется с полнофункциональными интеграциями для языков программирования: C++, C#, Visual Basic и др. VS можно дополнить любым языком программирования, который следует определенному набору соглашений (реализует заданные интерфейсы). Однако наиболее распространенные интеграции Fortran от Intel [0] и PGI [0] реализуют лишь часть из них. Такая ощутимая разница между Fortran и базовыми языками от Microsoft явилась основанием для разработки FRIS, устраняющего этот пробел.

FRIS – это расширение для Microsoft Visual Studio, которое вводит полную поддержку базовых возможностей технологии IntelliSense для языка программирования Fortran, стандарта Fortran-2003 [0]. Его основной целью является поддержка быстрой разработки приложений.

На данный момент FRIS (версия 0.9.6.0) встраивается в Microsoft Visual Studio 2005/2008/2010 при помощи созданного для этой цели пакета установки.

К основным возможностям, реализованным во FRIS, относятся:

- подсветка синтаксиса;
- выделение структурных элементов кода;
- поддержка панели навигации в текущем документе;

- поддержка XML комментариев документирования;
- все функции технологии IntelliSense [0]:
  - поддержка списка элементов производных типов данных;
  - поддержка списков автодополнения;
  - отображение сведений о параметрах подпрограмм и функций;
  - отображение кратких сведений об элементе языка программирования;
- поддержка перехода к определению элемента языка программирования;
- поддержка работы со сниппетами исходного кода;
- поддержка работы с панелью Список ошибок (ErrorList);
- расширенная поддержка библиотек программ, заключающаяся в выделении цветом элементов библиотек в файле исходного кода:
  - встроенных функций и подпрограмм Fortran-2003 [0];
  - библиотек ИТМФ: УРС-ОФ[0] (рисунок), ЕФР [0].

Left Editor (No Highlighting)	Right Editor (Syntax Highlighting)
PROGRAM nz_of3_update	PROGRAM nz_of3_update
use urs_of	use urs_of
implicit none	implicit none
type(urs_type) w	type(urs_type) w
type(fot_type) f	type(fot_type) f
type(fot_key) kf	type(fot_key) kf
call MPI_Init (err)	call MPI_Init (err)
! InitUrsOf	! InitUrsOf
call InitUrsOf_MPI (namem,w,f,ofdata,kf,out,ko,kan,0,MPI_COMM_WORLD)	call InitUrsOf_MPI (namem,w,f,ofdata,kf,out,ko,kan,0,MPI_COMM_WORLD)
call handler_of_fot (nk,ofdata,f)	call handler_of_fot (nk,ofdata,f)
call ReleaseUrsOf(ofdata,ko,kan)	call ReleaseUrsOf(ofdata,ko,kan)
END	END

Подсветка синтаксиса УРС-ОФ (слева отсутствует, справа присутствует)

FRIS повышает производительность разработчиков Fortran программ – тем больше, чем сложнее комплекс программ. Поэтому планируется дополнить текущую версию FRIS поддержкой средств параллельного программирования MPI 3.0 [0] и OpenMP 4.0 [0], неизбежно приводящих к усложнению программирования.

## Литература

1. Intel® Fortran Composer XE 2013 SP1 Release Notes [Electronic resource] Mode of Access: <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-fortran-composer-xe-2013-sp1-release-notes>.
2. PGI Visual Fortran [Electronic resource] Mode of Access <http://www.pgroup.com/products/pvf.htm>.
3. Information technology – Programming languages – Fortran – Part 1: Base Language ISO/IEC 1539-1:2004.
4. Using IntelliSense [Electronic resource] Mode of Access [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hcwl1s69b\(v=vs.110\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hcwl1s69b(v=vs.110).aspx).
5. Гордеев Д. Г., Голубкова Е. Ф., Гударенко Л. Ф., Куделькин В. Г., Сапронова О. В. Современное состояние пакета программ УРС-ОФ для расчета термодинамических и механических свойств веществ // XII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. трудов, г. Саров, 11–15 ноября 2010 г.
6. Волгин А. В., Тарасов В. И., Красов А. В., Кузнецов М. Ю. Библиотека ЕФР для универсального представления расчетных данных // «Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007. Вып. 11.
7. MPI: A Message-Passing Interface Standard Version 3.0; Message Passing Interface Forum; September 21, 2012
8. OpenMP Application Program Interface Version 4.0; OpenMP Architecture Review Board; July 2013.

## ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ВЕЩЕСТВОМ

*Р. Е. Рейновски*

Лос-Аламосская национальная лаборатория, США

Магнитогидродинамические задачи (задачи с использованием моделей сплошной жидкой среды и с электромагнитными полями) являются сложным, но полезным средством проверки достоверности кодов для решения связанных задач, получивших широкое распространение применительно к современным задачам прикладной физики. Современные методики импульсной мощности позволяют получать широкий спектр интересных экспериментальных данных, с помощью которых можно оценивать возможности и достоверность современных кодов для решения связанных задач.

Методики импульсной мощности позволяют получать экспериментальные данные в широком диапазоне временных и пространственных масштабов. С помощью взрывомагнитных генераторов в больших временных и пространственных масштабах можно оценить возможности моделирования МГД-задач с учетом множества факторов, например, поведения ВВ, взаимодействия ВВ и металла, уравнений состояния ВВ, продуктов взрыва и металла, моделей проводимости и диффузии потока в диапазоне от нормального до расплавленного состояния. Точное прогнозирование характеристик системы в целом, особенно при высоких значениях тока и плотности энергии, является очень серьезным тестом для расчетных моделей.

Эксперименты по имплозии конденсированных лайнеров, для которых характерны средние временные масштабы и специальные пространственные масштабы (1–10 мкс и 10 см) и в которых диагностика осуществляется методами рентгено- или протонографии, позволяют получать экспериментальные данные для тестирования крупномасштабных моделей динамики под действием магнитных полей, проводимости материалов и гидродинамики, которые лежат в основе описания роста неустойчивостей на контактной границе между полем и металлом. Микросекундная имплозия лайнера и современная высокоразрешающая диагностика позволяют получать данные для исследования и оценки достоверности моделей материалов в диапазоне скоростей деформации от высоких до очень высоких, а также точные данные о повреждении материалов для проверки моделей разрушения. Полученные ранее – зачастую методами оптической съемки – данные лайнерной имплозии в микросекундном диапазоне можно использовать для оценки достоверности данных по динамике сред, не имеющих прочности. Еще одна интересная задача, относящаяся к промежуточным масштабам – это моделирование работы прерывателей (размыкателей) тока – как взрывных, так и электровзрывных. При таких конфигурациях материалы меняют свое состояние в широком диапазоне пространства параметров – от нормального состояния до температуры плазмы и от нормального давления или умеренного сжатия до плотностей, в 10–100 раз ниже нормальной плотности. Имеются данные измерений характеристик тока, а в будущих экспериментах возможно получение данных методами динамической съемки.

При коротких (< 100 нс) временных масштабах и пространственных масштабах порядка сантиметра или менее с помощью высокоскоростного разгона конденсированных пластин, лайнерной имплозии и плазмы z-пинча можно получать данные другого рода, чтобы оценивать возможности расчетов, например переход из твердого состояния в плазму в проволочках и образование поверхностной плазмы на контактной границе между полем и металлом. Быстрая имплозия плазмы, в результате которой образуется мягкое рентгеновское излучение, иногда позволяет получать очень интересные данные для исследования образования излучения и механизмов связи в кодах для решения связанных задач.

В ближайшей перспективе возможности еще более интересных расчетов и экспериментов могут появиться в связи с исследованием поведения и свойств теплого плотного вещества (температура – несколько эВ, плотность – от нормальной до расширения в несколько раз). Возможно, МГД модели не могут в полной мере учесть сложный характер физических процессов, происходящих

в вырожденной плазме, и такие предельные состояния, по большей части, пока изучены не были – но это должно быть сделано.

В докладе будет кратко представлено несколько лагранжевых и лагранжево-эйлеровых МГД кодов и будут приведены примеры сравнения экспериментальных и расчетных данных, полученных в рамках действующих экспериментальных программ. Также будут обсуждаться некоторые предложения по будущим постановкам экспериментов и расчетов. Мощным инструментом исследований с растущим потенциалом использования являются методы частиц в ячейках и молекулярной динамики. Однако в настоящем докладе они обсуждаться не будут.

## **ВЕРИФИКАЦИЯ ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ НА ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

*В. Н. Речкин, А. В. Баранов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Цилиндрические оболочки широко применяются в современных технических сооружениях, конструкциях [1, 2], и во многих случаях определяют их низшие собственные частоты и формы колебаний, которые при вибрационном нагружении могут оказаться резонансными. В связи с этим для выбора оптимальных геометрических параметров и режимов эксплуатации конструкций, содержащих цилиндрические оболочки, необходимо иметь возможность выявлять с высокой точностью их основные собственные частоты и формы колебаний. Важно отметить, что экспериментальное исследование этих параметров в последнее время применяется все реже по причине высокой стоимости таких работ, поэтому актуальным является вопрос о точности расчетного анализа собственных частот и форм колебаний оболочек на основе современных пакетов программ (ПП).

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ и ряде других предприятий для решения задач механики деформируемого твердого тела широко применяется отечественный ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ. Поэтому в данной работе анализируются результаты верификации ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ на задачах по определению основных собственных частот и форм колебаний консольно защемленных цилиндрических оболочек постоянной и переменной толщины. Результаты численного решения задач сравниваются с данными экспериментов [3]. Выполняется анализ точности и сходимости численных решений. Численное решение задач выполнено с использованием «гибридных» восьмиузловых элементов сплошной среды первого порядка с расширенными функциями формы. С целью исследования сходимости результатов решение каждой задачи выполнено на трех конечно-элементных моделях различной размерности, подготовленных путем последовательного автоматизированного сгущения расчетных сеток.

### **Литература**

1. Grigorenko Ya. M., Grigorenko A. Ya. State and dynamical problems for anisotropic inhomogeneous shells with variable thickness (review) // *Int. Appl. Mech.* 2013. 49, N 2. P. 123–193.
2. Grigorenko A. Ya., Loza I. A. Non-axisymmetric waves in layered hollow cylinders with piezoceramic radially polarized layers // *Int. Appl. Mech.* 2013. 49, N 6. P. 641–649.

3. Будак В. Д., Григоренко А. Я., Хоришко В. В., Борисенко М. Ю. Исследование свободных колебаний цилиндрических оболочек постоянной и переменной толщины с помощью метода голографической интерферометрии // Прикладная механика. 2014. Т. 50, № 1. С. 101–109.

## ВОЗМОЖНОСТИ УЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РАЗРЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ

*В. Н. Речкин, А. И. Чембаров, С. С. Косарим, О. Л. Александрова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Одним из направлений развития пакета программ (ПП) ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ является разработка программных средств для решения задач на определение собственных частот и форм колебаний конструкций, в том числе и с учетом их напряженно-деформированного состояния (НДС) [1]. Решение таких задач является важной составной частью исследований динамического отклика конструкций при действии вибрационных нагрузок. Знание основных собственных частот колебаний конструкций позволяет оценить возможность их резонансного возбуждения в заданном диапазоне частот вибрационного нагружения, а также определить значение шага интегрирования по времени для решения задач динамического деформирования.

В некоторых случаях, когда возникающее в конструкциях НДС приводит к заметному изменению жесткости, расчет их основных собственных частот и форм колебаний необходимо проводить с учетом этих эффектов. Например, при расчете основных собственных частот и форм колебаний лопаток вращающегося турбинного диска необходимо учитывать влияние центробежной силы [2, 3]. При расчете основных собственных частот колебаний балок и тонкостенных элементов учитывается влияние значительных растягивающих или сжимающих сил [4–6]. Учет предварительного НДС при решении задач модального анализа конструкций необходим также в тех случаях, когда под действием приложенных сил значительно изменяется исходная геометрия. Изменение жесткости элементов конструкций вследствие значительного уровня квазистатических напряжений приводит к изменению значений их собственных частот колебаний. Такие особенности являются следствием взаимовлияния продольных и поперечных прогибов элементов систем, и их обычно требуется учитывать при анализе тонкостенных или рамных конструкций, изгибная жесткость отдельных элементов которых мала по сравнению с их жесткостью в продольном направлении.

В данной работе анализируются функциональные возможности ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ в части учета начального НДС конструкций при численном моделировании их собственных частот и форм колебаний. Приводятся особенности реализованных вычислительных алгоритмов и результаты решения шести верификационных задач модального анализа типовых конструкций с учетом их НДС, обусловленного различными механическими воздействиями. Выполняется анализ точности и сходимости результатов численных расчетов на основе сравнения с аналитическими решениями. Также приводятся результаты решения практической задачи по определению основных собственных частот и форм колебаний транспортной упаковки для элементов телескопа с учетом условий контактного взаимодействия деталей и их начального НДС от действия сборочных усилий.

### Литература

1. Спиридонов В. Ф., Рябов А. А., Циберев К. В., Дьянов Д. Ю., Речкин В. Н. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения квазистатических задач прочности и модального анализа // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 493-502.
2. Воробьев Ю. С., Шепель А. И., Романенко Л. Г., Водченко В. Н., Сапелькина З. В. Конечно-элементный анализ собственных колебаний статически напряженных лопаток турбомашин // Проблемы прочности. 1990, № 7. С. 88–94.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах / Под ред. В. Н. Челомей (пред). М.: Машиностроение, 1980. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. 1980.
4. Timoshenko S. Vibration Problems in Engineering, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1937.
5. Lindberg V. Berechnung der ersten Eigenfrequenz eines Balkens in Fliehkraftfeld mit Rayleigh Quotient: Internal report HTGE-ST-0051, Brown Boveri & Cie., Baden, Switzerland, 1986.
6. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в трех томах / Под ред. И. А. Биргера. и Я. Г. Пановко М.: Машиностроение, 1968.

## О СХЕМАХ ТИПА MUSCL И РАЗРЫВНОМ МЕТОДЕ ГАЛЕРКИНА

*А. В. Родионов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Схемы типа MUSCL появились в результате развития схемы Годунова [1], основная идея которой заключается в следующем. Если перед началом расчета нового шага по времени сделать предположение о постоянстве параметров внутри каждой ячейки (т. е. известные осредненные величины распространить на всю ячейку), то вычислить значение потоковых величин на гранях ячейки можно точно – для этого нужно воспользоваться решением задачи Римана (задачи о распаде разрыва). Схема Годунова является исключительно надежной, гибкой и универсальной схемой, однако она имеет только первый порядок точности как по пространству, так и по времени.

В модификациях схемы Годунова второй порядок точности по пространству обеспечивается использованием линейной аппроксимации параметров внутри ячейки [2–7]. Кроме того, в схемах типа MUSCL второй порядок точности по времени достигается переходом от решения классической задачи Римана к решению т.н. обобщенной задачи Римана, когда по обе стороны от разрыва параметры имеют линейные распределения (в общем случае – полиномиальные). Для уравнений газовой динамики решение обобщенной задачи Римана находится приближенно – в рамках той или иной аппроксимации [3–7].

Считается, что в схемах типа Годунова получение более высокого, третьего порядка точности требует привлечения кусочно-параболической аппроксимации, как это делается в известном методе PPM [8]. Однако оказывается, что существуют алгоритмы, позволяющие достигать третьего порядка точности и при использовании кусочно-линейной аппроксимации.

Если обратиться к истории, то первая версия MUSCL-схемы для расчета течений идеального сжимаемого газа была описана ван Лиром в статье [3], завершившей серию его публикаций под

общим заголовком «Towards the ultimate conservative difference scheme». В предшествующей статье этой серии [9] ван Лир на примере решения линейного уравнения переноса рассмотрел и исследовал три варианта развития схемы Годунова с опорой на кусочно-линейную аппроксимацию; эти варианты он обозначил как схема I, схема II и схема III. Схема I стала потом базой для первой MUSCL-схемы [3], а схема II является прототипом для одной из ее последующих версий [5]. Наиболее сложная схема III долгое время оставалась невостребованной, хотя и обладает уникальным свойством – при решении линейных уравнений она демонстрирует третий порядок точности. Прошло более четверти века, прежде чем схема III нашла свое продолжение в качестве одного из вариантов разрывного метода Галеркина [10].

В данной работе рассказывается о связи схемы III с разрывным методом Галеркина (метод DG) и о возможных путях ее обобщения на случай решения нелинейных уравнений. На этой базе строится новая схема MUSCL-DG. Выявляются различия между традиционными способами получения полностью дискретной формы метода DG и тем, как эта форма реализуется в схеме MUSCL-DG. Обсуждаются вопросы «суперсходимости» метода DG в связи с работами Шу и коллег (см., например, [11]). На примере решения тестовых задач исследуется эффективность схемы MUSCL-DG по сравнению с другими схемами.

### Литература

1. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // *Мат. сборник*. 1959. Т. 47, № 3. С. 271–306.
2. Колган В. П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечноразностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // *Ученые записки ЦАГИ*. 1972. Т.3, № 6. С. 68–77.
3. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // *J. Comput. Phys.* 1979. Vol. 32. P. 101–136.
4. Van Leer B. On the relation between the upwind-differencing schemes of Godunov, Engquist-Osher and Roe // *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 1984. Vol. 5. P. 1–20.
5. Ben-Artzi M., Falcovitz J. A second-order Godunov-type scheme for compressible fluid dynamics // *J. Comput. Phys.* 1984. Vol. 55. P. 1–32.
6. Colella P. A direct Eulerian MUSCL scheme for gas dynamics // *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 1985. Vol. 6. P. 104–117.
7. Родионов А. В. Повышение порядка аппроксимации схемы С. К. Годунова // *Журнал вычисл. мат. и мат. физ.* 1987. Т. 27, № 12. С. 1853–1860.
8. Colella P., Woodward P. The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations // *J. Comput. Phys.* 1984. Vol. 54. P. 174–201.
9. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. IV. A new approach to numerical convection // *J. Comput. Phys.* 1977. Vol. 23. P. 276–299.
10. Huynh H. T. An upwind moment scheme for conservation laws // *Computational Fluid Dynamics 2004*. Springer, Berlin, 2006. P. 761–766.
11. Cheng Y., Shu C.-W. Superconvergence and time evolution of discontinuous Galerkin finite element solutions // *J. Comput. Phys.* 2008. Vol. 227. P. 9612–9627.

## О ПРИМЕНЕНИИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ В СХЕМАХ ТИПА ГОДУНОВА ДЛЯ БОРЬБЫ С «КАРБУНКУЛ»-НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ

*А. В. Родионов, И. Ю. Тагирова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Схема Годунова [1] и ее модификации повышенного порядка точности являются одними из наиболее эффективных инструментов решения уравнений газовой динамики. Однако в 1988 году была обнаружена серьезная проблема в применении методов типа Годунова к задачам гиперзвуковой аэродинамики-«carbunclephenomenon» [2]. Эта проблема привлекла к себе внимание большого числа специалистов в области численного моделирования. Показательно, что спустя двадцать лет vanLeer в своем обзоре [3], посвященном истории развития численных методов в США и Канаде, выделил «карбункул»-проблему как одну из главных нерешенных проблем классических конечно-объемных схем.

Феномен «карбункула» представляет собой численную неустойчивость, которая проявляется при сквозном расчете сильных ударных волн в гиперзвуковых потоках и приводит к сильному искажению поля течения. Наиболее сильно карбункул-неустойчивость наблюдается в случаях, когда фронт ударной волны совпадает с сеточной линией или немного отклонен от нее. Было установлено, что карбункул-неустойчивость зависит от метода решения задачи Римана, причем наиболее диссипативные и менее точные методы обычно дают приемлемые результаты.

Основные способы борьбы с «карбункул»-неустойчивостью связаны с модификацией методов решения задачи Римана [4]. Один из наиболее эффективных способов заключается в применении различных решателей для разных направлений [5].

В данной работе исследуется новый способ борьбы с «карбункул»-неустойчивостью, который является внешним по отношению к конкретной схеме и не меняет алгоритм расчета «невязких» потоков. На фронте УВ в базовый метод решения уравнений Эйлера предлагается добавлять некоторое количество сеточно-инвариантной диссипации в форме правых частей уравнений Навье–Стокса («вязких» членов), но с заменой коэффициента молекулярной вязкости на коэффициент искусственной вязкости и с введением искусственной теплопроводности в предположении числа Прандтля  $Pr = 1$ .

Выражение для искусственной вязкости согласуется с [6], однако сделано обобщение на многомерность и введена «пороговая» величина:

$$\mu = k_1 \rho l^2 \max(0, -\text{div} \bar{u} - k_2 a/l),$$

где  $a$  – скорость звука,  $l$  – «характерный» размер ячейки,  $k_1$ ,  $k_2$  – эмпирические коэффициенты. На основе численных расчетов были выбраны следующие значения коэффициентов:  $k_1 = 0,5$ ,  $k_2 = 0,02$ .

Новый способ тестируется на схеме Годунова и ее модификации второго порядка точности (схеме Годунова–Колгана–Родионова [7]) с использованием точного решателя задачи Римана. Эффективность применения искусственной вязкости демонстрируется на примере решения ряда задач: гиперзвуковое обтекание цилиндра, задача Quirk, задача Noh, седовский взрыв, doubleMachreflection, дифракция сильной ударной волны на 90-градусном угле.

### Литература

1. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики. Мат. сборник. 1959. Т. 47, № 3. С. 271–306.

2. Peery K. M., Imlay S. T. Blunt body flow simulations // AIAA Paper 88-2924, 1988.
3. van Leer B. The development of numerical fluid mechanics and aerodynamics since the 1960s: US and Canada / Ed. by E. H. Hirschel et al. // Notes on Num. Fluid Mech. 2009. Vol. 100. P. 159–185.
4. Quirk J. J. A contribution to the great Riemann solver debate // Int. J. Numer. Meth. Fluids. 1994. Vol. 18. P. 555–574.
5. Nishikawa H., Kitamura K. Very simple, carbuncle-free, boundary-layer-resolving, rotated-hybrid Riemann solvers // J. Comput. Phys. 2008. Vol. 227. P. 2560–2581.
6. von Neumann J., Richtmyer R. D. A method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks // J. Appl. Phys. 1950. Vol. 21. P. 232–237.
7. Родионов А. В. Монотонная схема второго порядка аппроксимации для сквозного расчета неравновесных течений // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 1987. Т. 27, № 4. С. 585–593.

## ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ INTEL ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Д. А. Сивков, А. В. Авдеев*

Intel Corporation, г. Нижний Новгород

В докладе говорится о современных тенденциях разработки высокопроизводительных приложений и дается обзор новейших программных инструментов Intel - Intel® Parallel Studio 2015 и Intel® Cluster Studio 2015, которые включают оптимизированные компиляторы, математические библиотеки и средства оптимизации и распараллеливания программ. Эти инструменты позволяют разработчикам оптимизировать скорость работы приложений в системах на базе процессоров текущего и будущих поколений, включая новейшие сопроцессоры Intel® Xeon Phi™. Наборы инструментов помогают специалистам с наименьшими усилиями повышать производительность приложений, запускаемых на серверах, вычислительных кластерах, рабочих станциях и настольных ПК. Будут показаны примеры эффективного использования программных инструментов Intel для эффективных параллельных вычислений при моделировании физических процессов.

### Литература

1. Intel® Software [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.intel.com/software/products>.
2. Intel® Software case-studies, online trainings, forums and other resources [Electronic resource] Mode of Access:  
<https://software.intel.com/en-us/articles/sdp-case-studies>  
<https://software.intel.com/en-us/developer-tools-technical-enterprise>  
<http://software.intel.com/en-us/intel-learning-lab/>  
<http://software.intel.com/en-us/articles/intel-sdp-resources/>  
<https://premier.intel.com> <http://software.intel.com/en-us/forums/>

## НЕСТРУКТУРИРОВАННАЯ ПРИЗМАТИЧЕСКАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

*М. Л. Сидоров, В. А. Пронин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В работе представлено описание и особенности реализации метода призматической дискретизации сложных геологических структур. Метод является двухэтапным.

На первом этапе производится генерация двумерной неструктурированной сетки в параллельном режиме на основе предложенного авторами фронтального метода сфер [1], который синтезирован из методов упаковки сфер [2], откусывания сферами [3] и подвижного фронта [4]. Двумерный генератор предназначен для создания планарных сеток с числом точек более миллиона. В частности, в параллельном режиме была получена планарная сетка с числом точек более 10 миллионов с использованием 289 процессоров. Время генерации сетки порядка 19 секунд.

После генерации двумерной неструктурированной сетки выполняется второй этап: построение трехмерной неструктурированной призматической сетки в параллельном режиме на основе обобщенного метода «угловой точки» с возможностью адаптации сетки под различные типы объектов: скважины сложной траектории, геологические разломы, пласты и т. п. Объемная сетка может иметь различное число ячеек вдоль оси аппликат в отличие от стандартного метода «угловой точки».

Целью работы является разработка сеточного генератора, покрывающего и превосходящего возможности зарубежных коммерческих аналогов для обеспечения конкурентоспособности отечественного программного комплекса НИМФА [5].

Максимальная сетка, построенная разработанным генератором, содержала 1,1 миллиарда ячеек и была построена с использованием 21600 процессоров за 4 минуты.

### Литература

1. Сидоров М. Л., Пронин В. А. Параллельный генератор двумерной неструктурированной сетки на основе фронтального метода сфер // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» / Под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.
2. Shimada K., Yamakawa A., Itoh T. Anisotropic triangular meshing of parametric surfaces via close packing of ellipsoidal bubbles // 6<sup>th</sup> International Meshing roundtable. 1997. P. 375–390.
3. Li X. Y., Teng S. H., Ungor A. Biting spheres in 3d // Submitted to the 8<sup>th</sup> International Meshing Roundtable. 2005.
4. Ito Y., Shih A. M., Soni B. K. Reliable Isotropic Tetrahedral Mesh Generation based on an Advancing front method // Proceedings of the 13<sup>th</sup> International meshing roundtable, Williamsburg, VA., 2004. P. 95–105.
5. Власов С. Е., Шагалиев Р. М., Дерюгин Ю. Н., Горев И. В., Глинский М. Л., Куваев А. А. Доработка, верификация и адаптация программного комплекса НИМФА с целью его широкого внедрения в практику гидрогеологических расчетов по оценке воздействия ЯРОО Госкорпорации Росатом на подземные, поверхностные воды и грунты // Разведка и охрана недр. 2013.

## РАЗВИТИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РЕШАТЕЛЯ СЛАУ ВО FLOWVISION В НАПРАВЛЕНИИ AMG-ПОДОБНЫХ АЛГОРИТМОВ И SIMD ОПТИМИЗАЦИИ

*Д. П. Силаев, С. А. Харченко, А. А. Ющенко*

ООО «ТЕСИС», г. Москва

В программном комплексе FlowVision при моделировании задач вычислительной аэро- и гидродинамики используются неявные схемы аппроксимации, что приводит к необходимости решать с высокой точностью плохо обусловленные разреженные системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности. При этом для пользователей программного комплекса важно быть уверенным в эффективности использования параллельной вычислительной техники для минимизации времени вычислений. В докладе рассматриваются некоторые вопросы, связанные с повышением эффективности решателя СЛАУ ParFBSS во FlowVision.

В большинстве программных комплексов моделирования задач вычислительной аэро- и гидродинамики используются многосеточные и алгебраические многосеточные методы (AMG) решения СЛАУ. Во FlowVision до настоящего момента использовались алгебраические методы решения СЛАУ, реализованные в решателе ParFBSS [1]. В разработке находятся два направления развития этих алгоритмов в сторону алгоритмов типа AMG. Первое направление состоит в реализации традиционного варианта [2] алгоритма типа AMG. Второе направление состоит в использовании AMG-подобного алгоритма с явным вычислением разреженного блочного оператора рестрикции и пролонгации на основе прямых и обратных итераций с матрицей и предобуславливанием. В этом алгоритме естественным образом возникают вычисления с мелко блочными разреженными матрицами и с блоками векторов. Кроме того, в нем отсутствуют неявные предположения о структуре решаемой СЛАУ, а необходимая для построения операторов рестрикции и пролонгации информация вычисляется явным образом. По этой причине второй вариант AMG-подобного алгоритма потенциально применим для более широкого класса СЛАУ, в том числе для плохо обусловленных задач механики. С другой стороны, это вычислительно более трудоемкий подход.

В современных многоядерных процессорах, как правило, имеется поддержка наборов SIMD инструкций SSE и AVX, оперирующих с 128-битными и 256-битными регистрами каждого вычислительного ядра процессора. В сопроцессоре Intel Xeon Phi архитектуры KNC основная вычислительная производительность достижима, прежде всего, если используются SIMD инструкции с 512-битными регистрами. В ParFBSS векторизован набор базовых вычислительных примитивов [3], возникающих при неполной факторизации мелко блочных матриц с размерами - степенями двойки, а также при проведении итераций предобусловленной блочной итерационной схемы с числом векторов - степенью двойки. Использование этих реализаций позволяет в разы ускорить выполнение соответствующих базовых вычислений, особенно в случае использования одинарной точности.

В докладе представлены результаты численных экспериментов в программном комплексе FlowVision для предлагаемых алгоритмов, в том числе с использованием SIMD векторных инструкций.

### Литература

1. Сушко Г. Б., Харченко С. А. Экспериментальное исследование на СКИФ МГУ «Чебышев» комбинированной MPI+threads реализации алгоритма решения систем линейных уравнений, возникающих во FlowVision при моделировании задач вычислительной гидродинамики // Труды международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009)». Нижний Новгород, 30 марта–3 апреля 2009. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. С. 316–324.

2. Голубев А. А., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Козелков А. С., Лашкин С. В., Силаев Д. П., Симонов П. Г. Пакет программ ЛОГОС. Алгебраический многосеточный метод решения СЛАУ для задач гидродинамики // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL Режим доступа: [www.science-education.ru/113-10982](http://www.science-education.ru/113-10982)

3. Nasonov A. A., Novokshchonov A. A., Zavyalov D. V. Optimization of block realization of algorithms of linear algebra using SIMD-instructions of the processor on the example of INTEL® MIC SIMD // III Международная научно-практическая конференция «Инновационные информационные технологии», Прага, 21–25 апреля 2014 г.

## **ПРОГРАММА «ТАНДЕМ» И ПРОТОТИП ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ СВЯЗАННЫХ РАСЧЕТОВ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК**

*И. Ю. Силантьева, Л. М. Зуева, Е. А. Кашаева, Г. Н. Малышкин,  
Д. Г. Модестов, Д. В. Могиленских, С. Ю. Мокшин, М. В. Никульшин,  
В. Г. Орлов, Е. Ю. Язова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики, г. Снежинск

Полномасштабный физический расчет кампании реактора включает в себя моделирование ряда физических процессов и в первую очередь тех, которые происходят в активной зоне. Соответственно сам расчет подразделяется на решение набора задач, направленных на получение характеристик этих процессов. При этом временная зависимость указанных характеристик определяется изменением ядерного состава элементов активной зоны. Кинетика этого процесса связана с конфигурацией нейтронного поля. Последнее, в свою очередь, зависит как от ядерного состава, так и от распределения температуры в объеме активной зоны. Таким образом, расчет кампании требует проведения как минимум трех видов расчетов: расчеты изменения со временем нуклидного состава топлива в реакторе за счет его выгорания, расчеты нейтронно-физических параметров активной зоны, теплогидравлические расчеты. Все три вида расчетов являются взаимосвязанными.

Для обеспечения связи между программами, осуществляющими моделирование различных физических процессов, создан программный комплекс ТАНДЕМ, работающий в распределенном режиме. Он состоит из ядра и набора следующих внешних программ. Для решения задач переноса ионизирующего излучения методом Монте–Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ создана и постоянно совершенствуется программа ПРИЗМА [1]. Для расчетов изменения со временем нуклидного состава топлива в реакторе за счет его выгорания используется программа РИСК [2]. Для проведения теплогидравлических расчетов активной зоны реакторной установки рассматриваются различные CFD программы [3, 4].

Связанные расчеты проводятся под управлением ОС LINUX и являются итерационным процессом. На основе набора команд штатного интерпретатора bash ОС LINUX разработан скрипт запуска комплекса расчетов, который обеспечивает совместную работу программ ПРИЗМА, CFD и стыковочного модуля ТАНДЕМ на вычислительных серверах как в параллельном, так и в распределенном режимах.

Разработан прототип графического интерфейса пользователя, который позволяет задавать входные данные, необходимые интегрированному расчетному коду для проведения связанных расчетов.

В докладе описывается технология, обеспечивающая проведение параллельных связанных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторов различных типов с учетом обратных связей по температуре и плотности материалов активной зоны.

Проведенные связанные расчеты для реакторных установок типа БРЕСТ, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 показывают возможность вычисления на современных вычислительных системах теплогидравлических характеристик реактора с использованием нейтронно-физических характеристик, оцененных методами статистического моделирования.

### Литература

1. Зацепин О. В., Кандиев Я. З., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н., Модестов Д. Г. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2011. Вып. 4. С. 64–74.
2. Модестов Д. Г. Разработка программного комплекса для расчета кампании реактора // XI Международная конференция «Забабахинские научные чтения». Снежинск, 16–20 апреля 2012. Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2012.
3. Chudanov V. V., et al. Current status and validation of CONV2D\&3D code // Proc. OECD/CSNI Workshop on in vessel core debris retention and coolability, Garching near Munich, Germany, March 3–6, 1998. Nuclear Safety NEA/CSNI/R (98) 18. 1999. P. 223–224.
4. OpenFOAM [Electronic resource] Mode of Access: <http://openfd.co.uk/openfoam>.

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО СПЕКТРА ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

*О. Г. Синькова, Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, О. Н. Чернышова, Г. С. Фирсова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Численно исследуется развитие гравитационного турбулентного перемешивания при вариации начального спектра возмущений контактной границы между тяжелым и легким веществами. Расчеты проводились как по 2D методике ЭГАК, так и по 3D методике ТРЭК.

Зависимости от времени ширины ЗТП на поздней (автомодельной) стадии близки во всех 3D вариантах как с гармоническими, так и со случайными начальными возмущениями. Точно также, приведенные к безразмерному виду величины турбулентной энергии и квадратичной пульсации плотности на автомодельной стадии в расчетах с гармоническими начальными возмущениями близки к полученным в 3D расчете со случайными возмущениями. Показано, что выход на автомодельный режим в сильной степени зависит от начальных данных задачи.

Полученное в численных 3D расчетах спектральное распределение скоростей и масштабов в высокочастотной области на автомодельной стадии близко к колмогоровскому распределению, соответствующему 3D турбулентности.

Рассмотрено также влияние на развитие ЗТП начальных локальных возмущений, амплитуды которых существенно больше амплитуды начальных фоновых возмущений. Проведено сравнение с известными экспериментальными данными по взаимному влиянию локальных возмущений на скорость роста ширины ЗТП и наоборот. Показано, что локальные возмущения в течение долгого времени могут влиять на развитие ЗТП, в том числе и на скорость роста ширины ЗТП.

Анализируется вопрос о влиянии счетной сетки на получаемые решения.

## ТРЕХСТАДИЙНЫЕ СИМПЛЕКТИЧЕСКИЕ РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ. КЛАССИФИКАЦИЯ, СРАВНИТЕЛЬНОЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

*В. Н. Софронов, В. Е. Шемарулин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Представлены результаты исследования многообразия трехстадийных симплектических разностных схем, предназначенных для численного решения натуральных гамильтоновых систем обыкновенных дифференциальных уравнений – систем с распадающимися гамильтонианами  $H(\bar{r}, \bar{p}) = K(\bar{p}) + U(\bar{r})$ . Рассматриваются только явные схемы.

Интерес к натуральным системам обусловлен тем, что они возникают в задачах молекулярной динамики, а интерес к трехстадийным схемам связан с поиском схем высокого порядка аппроксимации.

Одношаговый разностный метод называется симплектическим, если оператор перехода  $D^{n+1} = \partial(\bar{r}^{n+1}, \bar{p}^{n+1}) / \partial(\bar{r}^n, \bar{p}^n)$  осуществляет симплектическое преобразование [1] динамических переменных на каждом временном шаге. Необходимые и достаточные условия симплектичности для схем Рунге-Кутты получены в [2], [3]. Коэффициенты таких разностных схем определяются из условий симплектичности и условий порядка.

В классе одностадийных симплектических явных схем существует единственная симплектическая схема второго порядка аппроксимации – схема Verlet [4]. Среди двухстадийных симплектических схем не существует схем с порядком аппроксимации выше второго. В классе же трехстадийных схем существуют схемы третьего и четвертого порядков. Схемы третьего порядка образуют двухпараметрическое семейство.

Авторами проведена классификация схем третьего порядка, предъявлены все схемы четвертого порядка (их оказалось 7, некоторые схемы из этого списка опубликованы ранее – SIA4 [6], [7], RKN4 [8]), доказано отсутствие схем пятого порядка точности. Перечислены схемы, оптимальные по фазовой ошибке (однопараметрическое семейство схем с уменьшенной фазовой ошибкой  $O(K^6)$ ), показано, что схем четвертого порядка в этом семействе нет. Доказано, что единственной обратной симплектической схемой является схема SIA4.

Схемы с мнимыми параметрами рассматриваются наряду с вещественными и включаются в общий список, хотя вопросы реализации таких схем требуют отдельного рассмотрения. Сам факт использования схем с мнимыми коэффициентами не является новым. В качестве примера можно указать схему Розенброка (CROS) [5].

Для сравнительного исследования выбраны трехстадийные симплектические схемы с лучшими аппроксимационными свойствами и трехстадийная несимплектическая схема Рунге-Кутты ERK3 третьего порядка с набором параметров, обеспечивающим минимальную невязку [9]. Схема ERK3 включена в общий список для того чтобы выяснить, насколько важно выполнение условия симплектичности в задачах молекулярной динамики. Проведен сравнительный анализ разностных схем – ранжирование по соотношению «точность–экономичность». В качестве критерия точности использован дисбаланс полной энергии. Показано, что по соотношению «точность–экономичность» лучшей является схема RKN4 [8]. При фиксированном объеме вычислительной работы дисбаланс по сравнению со схемой Verlet уменьшен на 1,5–2 порядка. Результаты расчетов показывают, что среди всех рассмотренных схем только симплектические схемы обеспечивают стационарность полной энергии с приемлемым уровнем осцилляций.

### Литература

1. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1979.
2. Сурис Ю. Б. О сохранении симплектической структуры при численном решении гамильтоновых систем // Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: ИПМ. АН СССР. 1988. С. 148–160.
3. Sanz-Serna J. M. Runge-Kutta schemes for Hamiltonian system // BIT. 1988. Vol. 22, N 4.
4. Verlet L. Computer «experiments» on classical fluids. Thermodynamical properties of Lennard – Jones molecules // Phys. Rev. 1967. Vol. 159, N 1. P. 98–103.
5. Rosenbrock H. H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations // Comput. Journal. 1963. Vol. 5, N 4. P. 329–330.
6. Forest E, Ruth R. D. Fourth-order symplectic integration // Physica D. 1990. Vol. 43. P. 105–117.
7. Candy J., Rozmus W. A symplectic integration algorithm for separable Hamiltonian function // Journal of Computational Physics. 1991. Vol. 92. P. 230–256.
8. Софронов В. Н., Мокина К. С., Шемарулин В. Е. Разностные схемы молекулярной динамики. 1 Сравнительный анализ точности, устойчивости и экономичности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 2. С. 18–32.
9. Альшина Е. А., Закс Е. М., Калиткин Н. Н. Оптимальные схемы Рунге - Кутты с первого по шестой порядок точности // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 2007. Т. 47, № 9. С. 1538–1549.

### ПРОЕКТ «ВИРТУАЛЬНАЯ РУКА»

*И. С. Стародубцев*

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург

Развитие естественных интерфейсов на сегодняшний день идет очень широко. Наибольшее применение нашли интерфейсы, построенные на базе жестов рук как реализации естественных интерфейсов. Они применяются во многих областях жизни. Наиболее яркие примеры:

Использование в медицине:

- управление операцией в операционных комнатах для обеспечения режима стерильности оператора;
- стерильное взаимодействие с медицинским оборудованием;
- исследование взаимодействия человека с виртуальными объектами и окружением в психологических и физиологических задачах.

Использование в научно-инженерных задачах:

- навигация в абстрактных виртуальных пространствах, полученных в результате численного моделирования и визуализации расчетных/экспериментальных данных;
- управление робототехническим оборудованием, в том числе колесными и летающими платформами, действующими в сложных условиях.

Применение в бытовой и развлекательной сфере:

- управление мультимедийным оборудованием;
- в качестве контроллеров нового поколения в игровой сфере.

Широкое внедрение во все области жизни, в соответствии с законами рынка, привело к тому, что многие компании начали выпускать различные решения, которые являются реализациями различных сценариев взаимодействия с пользователем на основе естественных, и, в частности, жестовых, интерфейсов.

Несмотря на большое количество представленного на рынке оборудования, пока нет единых стандартов и форматов ввода/вывода. Это приводит к тому, что разрабатываемое программное обеспечение жестко привязано к одному оборудованию (а в некоторых случаях, даже к конкретному экземпляру). Также некоторые производители не предоставляют какое-либо API или SDK, а зачастую еще и ограничивают возможности разработки на законодательно-правовом уровне.

Все это приводит к тому, что область применения такого оборудования ограничивается только приложениями от производителей, которые чаще всего носят демонстрационный характер.

С точки зрения разработчика привязка к конкретному оборудованию не является эффективной. Особенно с учетом активного развития данной области рынка.

Таким образом, необходимо разработать программный комплекс, который бы позволял:

- абстрагироваться от уровня оборудования, работать с различными типами датчиков;
- абстрагироваться от задачи, иметь возможность настройки и разработки языка взаимодействия (интерфейса) под каждую конкретную задачу и под конкретного пользователя;
- использовать сторонние наработки, библиотеки и алгоритмы;
- использовать различные средства разработки (В том числе и различные среды разработки, и различные языки);
- использовать все это совместно с возможностью «модульной» замены любых частей на лету, без необходимости изменять содержательную часть программы.

В качестве решения предлагается программный комплекс «*VirtualHand*» («Виртуальная рука»):

Модульная архитектура позволяет использовать различные алгоритмы и заменять их без необходимости существенного изменения программы.

Унифицированные интерфейсы модулей и полная независимость позволяют использовать сторонние библиотеки и различные языки.

Использование внутреннего формата данных и вынесения преобразования данных с датчиков в отдельный модуль позволяют однообразно работать с любыми типами оборудования. Для замены датчика достаточно разработать модуль преобразования данных для конкретного датчика, не изменяя кода остальной программы. Также это открывает потенциальную возможность подключения еще несуществующих датчиков.

Использование системы модификаторов позволяет разрабатывать очень гибкие языки взаимодействия, реализующие как простой синтаксис и семантику, так и крайне сложный. Это позволяет разрабатывать интерфейсы, оптимизированные как для конкретной задачи, так и для конкретного пользователя.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы», проект 12-П-1-1034.

## ГЕТЕРОГЕННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В РАМКАХ СТАНДАРТА OPENCL

*О. Ю. Сударева, П. Б. Богданов*

НИИ системных исследований РАН, г. Москва

В последние несколько лет большую популярность приобрели вычислительные комплексы гибридной архитектуры на основе массивно-параллельных ускорителей.

В поле массивно-параллельных ускорителей большей частью на сегодняшний день представлены графические процессоры GPGPU. В то же время очень перспективно выглядит архитектура MIC от компании Intel. В последней редакции TOP500 на июнь 2014 первую строчку занимает суперЭВМ Tianhe-2 [1] производительностью ~ 55 Петафлопс, построенная на базе ускорителей Intel Xeon Phi, вторую – суперЭВМ Cray Titan [2] производительностью ~ 30 Петафлопс на базе NVIDIA Tesla K20X.

К сожалению, до сих пор нет единой общепринятой модели, в рамках которой можно было бы запрограммировать все вычислители на одном узле. Как следствие, нет единой модели и для программирования всей распределенной установки. Исследования подобных моделей ведутся.

В нашей работе мы приведем классификацию актуальных моделей гетерогенного программирования таких как StarPU[3], OpenACC[4], VexCL[5], ompSS[6], OpenMP 4.0[7] и т. п.

Стоит отметить, что при современной разработке научного и инженерного прикладного программного обеспечения очень редко можно встретить теоретические оценки вычислительной емкости реализуемых алгоритмов и их ожидаемой производительности на целевых аппаратных платформах. Мы предлагаем способ оценивать ожидаемую производительность задач еще до начала работы над реализацией, что позволяет определить, имеет ли смысл решать задачу на таких системах. В этой связи, нами была предложена методика оценки исходной задачи для формализованной в нотации стандарта OpenCL модели вычислительного узла и распределенной вычислительной установки в целом. Модели определяются набором параметров, таких как: количество массивно-параллельных сопроцессоров, объем памяти каждого, ширина полосы пропускания оперативной памяти устройства, пиковая производительность, и т. п. В рамках моделей можно проанализировать каждую вычислительную задачу и получить формулу для оценки ожидаемой производительности, зависящую от параметров. Мы продемонстрируем, что несколько известных классов задач могут быть эффективно перенесены на гетерогенные параллельные системы.

В работе представлена используемая нами инфраструктура гетерогенного программирования собственной разработки. Она являет собой планировщик команд, написанный в рамках модели OpenCL и способный обмениваться данными с другими планировщиками посредством MPI. Программа в такой инфраструктуре представляется в виде графа зависимостей команд, исполняемых на вычислительных устройствах. Один из вариантов управления распределенной системой с использованием данной инфраструктуры таков: каждое вычислительное устройство на узле управляется отдельным планировщиком, синхронизация осуществляется установкой зависимостей между командами из разных планировщиков, коммуникация между узлами осуществляется командами MPI-передачи данных.

Разработанная нами методология гетерогенного программирования была применена для решения широкого класса задач: запуска тестов HPL (Top500)[8] и NAS Parallel Benchmarks [9] (FFT, MG, CG); решения модельной задачи гидродинамики; моделирования эволюции тороидальной плазмы и т. д. Все коды были реализованы и запущены на распределенных гибридных установках. Были написаны все необходимые вычислительные ядра и общие алгоритмы, позволяющие решать эти задачи на распределенных установках, используя при этом все OpenCL-совместимые ускорители. Как побочный продукт, была получена версия гетерогенной библиотеки BLAS, позволяющая ускорить приложение на гибридном узле путем простой перелинковки с новой библиотекой. Достигнута масштабируемость вплоть до восьми ускорителей на узле [10].

Тестовые запуски проведены на широком классе аппаратных архитектур и конфигураций вычислительного узла: один узел с 2xIntel Xeon CPU и 8xACC(AMD Radeon GPU, NVIDIA TITAN), суперкомпьютер K100(64 узла: 2xIntel Xeon X5690 и 3xNVidia TeslaGPU M2050)[11], K10 (6 узлов: 2xIntel Xeon E5-2620 и 3xNVidia TeslaGPU 2090)[12], перспективные мини-суперЭВМ НИИСИ РАН собственных конфигураций.

Реализация всех задач состоит из трех этапов: теоретические оценки ожидаемой производительности, написание вычислительных ядер на языке OpenCL C и создание верхней логики (графа зависимостей) как программы для планировщика. В нашей презентации вопросы написания ядер не затрагиваются (это тема заслуживает отдельного изложения), а все внимание будет посвящено методике получения теоретических оценок ожидаемой производительности, написанию программ-графов зависимостей для указанных задач, обсуждению полученных результатов и дальнейших перспектив развития этого подхода.

Простота и прозрачность программной модели, относительная легкость разработки кодов реальных задач, а также их отличная масштабируемость свидетельствуют о жизнеспособности выбранного подхода. Стоит также отметить, что одним из основных достижений является переносимость разрабатываемого кода на все известные на сегодня аппаратные платформы. Конечно,

в некоторых случаях особо критичные вычислительные ядра на OpenCL С необходимо будет портировать с учетом специфики конкретной аппаратуры. Верхний же уровень логики при этом остается неизменным для всех аппаратных платформ. В будущих работах мы планируем наращивать пакет прикладного программного обеспечения с использованием программной инфраструктуры гетерогенного программирования.

### Литература

1. Dongarra J. J.: Visit to the National University for Defense Technology Changsha, China / *Technical report, Oak Ridge National Laboratory*, 18p, 2013.
2. [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.olcf.ornl.gov/titan/>
3. [Electronic resource] Mode of Access: <http://runtime.bordeaux.inria.fr/StarPU/>
4. [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.openacc-standard.org/>
5. [Electronic resource] Mode of Access: <https://github.com/ddemidov/vexcl>
6. [Electronic resource] Mode of Access: <http://pm.bsc.es/ompss>
7. [Electronic resource] Mode of Access: <http://openmp.org/wp/openmp-specifications/>
8. [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>
9. [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html>
10. [Electronic resource] Mode of Access: <http://devgurus.amd.com/thread/159457>
11. [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.kiam.ru/MVS/resourses/k100.html>
12. [Electronic resource] Mode of Access: <http://www.kiam.ru/MVS/resourses/#k10>

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТВОРОК ПОДПИТКИ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА

*И. Д. Танненберг, Ю. Е. Ермакова*

Филиал ОАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого», г. Москва

В данной работе проводится комплексное моделирование работы створок подпитки воздухозаборника. Процесс моделирования выполнен в сопряженной постановке и разделен на два этапа: аэродинамический расчет нестационарного обтекания подвижных створок и прочностной расчет соударения створок о стенки воздухозаборника. Для обеспечения достаточной для проектирования точности методика прошла этап валидации на различных по степени сложности моделях.

Для аэродинамического моделирования использовался решатель ПК ЛОГОС – Аэрогидромеханика с дополнительными настройками, обеспечивающими перекрытие сеточных моделей створок и сеточной модели воздухозаборника. Полученная конфигурация сеточных моделей позволила корректно проводить интерполяцию данных потока на всем диапазоне углов вращения створок. Газодинамический расчет проводился в два этапа: на первом этапе проводился стационарный расчет, в котором створки были неподвижны и находились в закрытом положении; на втором этапе проводился нестационарный расчет, при котором створки свободно вращались в нишах, а также испытывали соударения со стенками воздухозаборника с заданным коэффициентом упругого демпфирования. Были проведены расчеты кинематических и динамических характеристик створок при различных режимах полета самолета и работы силовой установки. Получены наиболее критичные режимы, которые стали исходными для расчета прочности.

Расчет НДС проводился с использованием решателя ПК ЛОГОС – Прочность для определения критически нагруженных зон, при ударе створок подпитки о стенки воздухозаборника. На один

аэродинамический расчет обтекания свободно движущихся створок подпитки при определенном режиме полета приходился один прочностной расчет створки, наиболее нагруженной в момент удара.

В результате расчетов были сформированы рекомендации для конструкторской проработки с целью повышения эффективности створок подпитки воздухозаборника серийного образца.

### Литература

1. Пакет программ Логос – Аэрогидромеханика, техническое руководство, © 2013, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИТМФ.

2. Пакет программ Логос – Прочность, техническое руководство, © 2013, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИТМФ.

## МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА CUMPS

*А. Б. Терентьев, С. А. Савихин, С. А. Золотов, А. А. Панкратов, Д. Е. Борисов*

Научно-исследовательский центр специальных вычислительных технологий,  
г. Нижний Новгород

На сегодняшний день одной из критических проблем вычислительных методов естественных наук является обеспечение масштабируемости численных решений. Классические методы численного моделирования в физике, химии, биологии, геологии, астрономии и пр. основаны, как правило, на решении систем дифференциальных уравнений (в общем случае нелинейных). Этот подход имеет длинный ряд общеизвестных проблем: нерегулярность вычислительного метода, громоздкие математические выкладки, связанные с описанием граничных условий и неоднородностей среды, зачастую практическая невозможность одновременного описания различных фазовых состояний и/или разнородных физических процессов, вследствие чего все эти методы имеют существенные ограничения по эффективности вычислений на системах, содержащих большое и очень большое количество вычислительных элементов (узлов, процессоров, ядер).

В основе предлагаемого нами подхода к моделированию лежит использование локальных правил для описания глобальных процессов. Локальный подход основан на известной из нелинейной динамики возможности описания поведения системы в целом в виде набора правил поведения ее частей на локальном уровне. В силу локальности правил распараллеливание происходит на уровне математического метода, из чего следует возможность бесконфликтного распределения задач на большое число вычислителей. Начальные и граничные условия, внешние воздействия, константы и неоднородности также представляются в виде конечного набора параметров и их взаимозависимостей. Существует довольно длинный ряд источников локальных правил. Наиболее известным являются уравнение Больцмана и его производные (LBM, VTE) и другие кинетические методы (например, уравнение Власова для плазмы, метод Шан/Чен для многофазных жидкостей и проч.). Другим важнейшим источником является статистическая физика. К форме локальных правил также сводятся явные численные схемы решения традиционных (дифференциальных и алгебраических) уравнений. Продуктивным является и «интуитивный» подход, когда локальные правила формулируются не из строгих математических описаний, а на основе физических закономерностей.

С учетом описанного выше нами был разработан программный комплекс для моделирования сложных неоднородных взаимосвязанных процессов CUMPS. Данный продукт позволяет пользователю по написанному им набору локальных правил эффективным образом использовать ресурсы суперкомпьютера. Последнее достигается за счет разработанного нами алгоритма распределения численной задачи на вычислительные устройства и управления передачей и синхронизацией данных на них.

Для демонстрации применимости и эффективности создаваемого продукта нами был рассмотрен ряд следующих задач:

1) моделирование распространения электромагнитного поля при грозовой активности в трех слоях атмосферы с учетом изменения тензора проводимости (в частности, с учетом холловской и педерсеновской компонент), внешнего магнитного поля, наличия трех разномасштабных по пространству и времени действия компонент источника тока (непрерывного тока, тока возвратного удара и М-компоненты), а также произвольного направления вектора тока;

2) моделирования задач гидро- и термодинамики: обтекание твердых тел, моделирование конвективных потоков и связанных с ними процессов;

3) моделирование зарождения, развития и распространения лесного пожара с учетом специфики Нижегородской области. Данная задача является наиболее показательной, поскольку объединяет целый комплекс взаимосвязанных процессов: моделирование распространения потоков воздуха с учетом влияния температуры, химических процессов, происходящих под влиянием огня, учет теплового излучения во всех описанных выше процессах, а также влияние ветра, рельефа и состава атмосферы и лесного массива.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ШУМА ОТКРЫТОГО РОТОРА НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

*В. А. Титарев, И. В. Беляев, Р. А. Скворцов*

Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, г. Москва

В рамках развития вычислительных подходов в аэроакустике [1] в ЦАГИ разрабатывается собственный комплекс программ численного моделирования задач аэродинамики и акустики. Комплекс основан на использовании явных и неявных TVD схем на произвольных неструктурированных сетках во вращающейся системе координат. Текущая версия программного комплекса [2, 3] позволяет эффективно вести невязкие расчеты для произвольной геометрии одиночного винта на числе процессорных ядер до 1024.

В настоящей работе рассматриваются вопросы обобщения программного комплекса на случай конфигурации типа открытый ротор, состоящей из двух винтов, вращающихся в противоположные стороны. Основной целью является создание пакета, позволяющего вести расчеты шума открытого ротора в широком диапазоне расчетных параметров с использованием современных суперкомпьютеров. В качестве первого приближения решение задачи строится в квазистационарной постановке с использованием двух систем координат, вращающихся в разные стороны. На границе между областями аэродинамическое решение полагается слабо зависящим от угловой координаты, по которой производится усреднение. С помощью данного метода решения можно с приемлемой точностью рассчитывать тягу открытого ротора, а также производить предварительную оценку его шума с помощью поверхности ФВХ.

На втором этапе будет рассматриваться обобщение решателя на полностью нестационарную задачу. При этом на граничной поверхности между двумя областями расчетной сетки, вращающимися в разные стороны, производится интерполяция с учетом противовращения. Важной модифи-

кацией метода решения является переход от одношаговой неявной схемы к неявной схеме с внутренними итерациями, позволяющей эффективно строить нестационарное решение задачи.

Будут представлены текущие результаты и примеры реализации авторами выбранной стратегии развития вычислительного пакета.

### Литература

1. Копьев В. Ф., Чернышев С. Л. Развитие методов вычислительной аэроакустики в ЦАГИ // Труды VI Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления РАСО 2012». Т. 3. С. 254–265.

2. Копьев В. Ф., Титарев В. А., Беляев И. В. Применение суперкомпьютерных технологий к расчету шума винта. Труды III Открытой Всероссийской конференции по авиационной акустике (1–3 октября 2013, г. Звенигород). С. 66–67.

3. Копьев В. Ф., Титарев В. А., Беляев И. В. Разработка нового подхода к расчету шума винтов с использованием суперкомпьютеров // Ученые записки ЦАГИ. 2014, № 2. С. 78–106.

## МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ ВЫСОТНОГО ПОЛЕТА

*В. А. Титарев*

Вычислительный центр РАН, г. Москва

Создание летательных космических аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы, тесно связано с задачами расчета их динамического и теплового взаимодействия с воздушной средой. При большой высоте полета аппарата классические способы численного моделирования, основанные на уравнениях Навье–Стокса сжимаемого газа, становятся неприменимы. Наиболее популярным в настоящее время способом моделирования течений разреженного газа, в частности решения задач гиперзвуковой аэродинамики, является метод прямого статистического моделирования (DSMC в западной терминологии). Альтернативой использованию статистических методов является прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана для функции распределения молекул по скоростям с точным либо модельным интегралом столкновений. Детерминистическая природа уравнения позволяет создавать эффективные неявные методы высокого порядка аппроксимации по всем переменным, как для стационарных, так и для нестационарных течений.

Большинство описанных в литературе численных методов и комплексов программ для кинетических уравнений не приспособлены для серийных расчетов гиперзвуковых течений из-за низкого (первого) порядка аппроксимации на произвольных сетках, явного метода дискретизации по времени, а также необходимости использовать структурированную равномерную сетку в скоростном пространстве. Развитие методов прямого численного решения кинетических уравнений, применимых для прикладных задач аэродинамики спускаемых аппаратов, ведется в очень небольшом числе научных организаций России (ВЦ РАН), Франции, США и Китая.

В настоящей работе будет представлено обобщение разрабатываемого автором численного метода решения кинетического уравнения [1, 2] на случай высокоскоростных течений разреженного газа. Будет представлен алгоритм построения адаптивной неструктурированной сетки в пространстве скоростей для течений одно- и двухатомных газов, являющийся обобщением методов [3, 4]. Сетка должна быть адаптирована к функции распределения в набегающем потоке (типа delta функции), на фронте ударной волны (безразмерная температура порядка 30–100) и вблизи поверхности тела

(температура поверхности порядка 10). Используемые разностных схемы будут адаптированы к эффективному решению стационарных и нестационарных задач внешнего обтекания спускаемых аппаратов. В качестве примеров применения метода будут представлены расчеты обтекания тел простой формы, а также модели ВКА ЦАГИ.

Полученная версия пакета программ «Несветай 3Д» может использоваться в работе РКК «Энергия» им. С. П. Королева, НПО Машиностроения, а также других академических и промышленных организаций.

### Литература

1. Титарев. В. А. Неявный численный метод расчета пространственных течений разреженного газа на неструктурированных сетках // Журнал выч. мат. и мат. физ. 2010. Т. 50, № 10. С. 1811–1826.
2. Titarev V., Dumbser M., Utyuzhnikov S. Construction and comparison of parallel implicit kinetic solvers in three spatial dimensions // J. Comp. Phys. 2014. Vol. 256. P. 17–33.
3. Arslanbekov R. R., Kolobov V. I., Frolova A. A. Kinetic solvers with adaptive mesh in phase space // Physical Review E. 2013. Vol. 88. 063301
4. Baranger C., Claudel J., Hérouard N., Mieussens L. Locally refined discrete velocity grids for stationary rarefied flow simulations // J. Comput. Phys. 2014 Vol. 257, N 15. P. 572–593

## КОНТИНУАЛЬНО-АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

*В. Б. Фокин<sup>1</sup>, П. Р. Левашов<sup>1,2</sup>, М. Е. Поварницын<sup>1</sup>, К. В. Хищенко<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

Изучается взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с металлом путем численного моделирования. Используется улучшенная версия комбинированной модели [1], которая основана на молекулярно-динамическом моделировании для ионов и решении уравнения теплопроводности для электронов. В нашей версии модели учитывается поглощение лазерного излучения в соответствии с уравнением Гельмгольца, а также зависимости коэффициентов электронной теплопроводности и электрон-ионного обмена от плотности и температуры [2]. Электронная теплоемкость описывается моделью Томаса–Ферми, взаимодействие ионов определяется посредством межчастичного потенциала ЕАМ. Для расчетов используется параллельная версия свободно распространяемого ПО LAMMPS, запуск производится в параллельном режиме (до 500 процессов).

Для описания взаимодействия лазерного импульса с веществом также можно использовать двухтемпературную гидродинамическую модель [3], для замыкания в которой необходимо двухтемпературное многофазное уравнение состояния металлов. С этой моделью [3] мы производили сравнение результатов наших расчетов. Построена фазовая диаграмма, которая показывает хорошее согласие по термодинамическим свойствам используемого потенциала ЕАМ и многофазного уравнения состояния для алюминия.

Рассматриваемая комбинированная модель более корректно (по сравнению с гидродинамической моделью [3]) воспроизводит динамику лазерной абляции, процессы плавления, испарения, нуклеации, распространения ударных волн и волн разрежения, а также формирования наночастиц. В данной работе мы проводим моделирование абляции алюминия под воздействием импульса дли-

тельностью 100 фс с интенсивностью вплоть до 20 Дж/см<sup>2</sup> и находим зависимость глубины кратера от плотности энергии лазерного излучения. Одновременно мы исследуем режимы формирования наночастиц и их распределение по размерам. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

### Литература

1. Ivanov D. S., Zhigilei L. V. Combined atomistic-continuum modeling of short-pulse laser melting and disintegration of metal films // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. P. 064114.
2. Povarnitsyn M. E., et al // Appl. Surf. Sci. 2012. Vol. 258. P. 9480.
3. Povarnitsyn M. E., Itina T. E., Sentis M., Khishchenko K. V., Levashov P. R. Material decomposition mechanisms in femtosecond laser interactions with metals // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. P. 235414.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА

*А. К. Харрисон*

Лос-Аламосская национальная лаборатория, США

В состав лагранжева/лагранжево-эйлерова программного комплекса FLAG для расчета задач механики сплошной среды входит пакет для моделирования пыления с металлических поверхностей при выходе на них ударной волны. Выбрасываемые при пылении частицы слишком малы для их разрешения на расчетной сетке, поэтому для их учета используется метод частиц в ячейках.

В докладе представлены модели источника и переноса, реализованные в пакете для моделирования пыления. В частности, новая модель источника была реализована на основе феноменологии неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, а также модели TAB (Taylor Analogy Breakup), описывающей дробление частиц.

В основе модели источника Рихтмайера–Мешкова лежит гипотеза о том, что выброс частиц с металлических поверхностей под действием ударных волн, в основном, происходит в тех случаях, когда в момент выхода ударной волны поверхность находится в жидком состоянии, и что поэтому выбрасываемые частицы являются каплями, оторвавшимися от «струй» при развитии неустойчивости Рихтмайера-Мешкова в жидкой среде. Для определения массовой скорости пыления используется теоретическая модель [1] расчета скорости роста пузырьков и струй. В докладе будет представлено подробное описание реализации и примеры расчетов.

Модель TAB была разработана О’Роурке и Амсденом [2] для моделирования распада капель в аэрозолях в коде KIVA. В ее основе лежит обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) второго порядка, описывающее смещение экватора капли относительно равновесного положения в виде затухающего гармонического осциллятора. Осцилляции возникают в связи с движением капли относительно фонового газа, возвращающая сила связана с поверхностным натяжением, а затухание – с вязкостью жидкости. Численная реализация FLAG предусматривает решение ОДУ и проверку после каждого цикла, не превысила ли деформация каждой капли порога распада. Если это условие выполняется, то рассчитывается распределение дочерних частиц по размерам и характерный разброс боковых скоростей, а материнская капля в расчете заменяется дочерней каплей, которая берется с учетом полученных распределений по размеру и возможных направлений бокового ускорения.

В докладе будет описана модель TAB и ее реализация во FLAG и представлены примеры расчетов.

## Литература

1. Buttler W. T., Oró D. M., Preston D. L., Mikaelian K. O., Cherne F. J., Hixson R. S., Mariam F. G., Morris C., Stone J. B., Terrones G., Tupa D. Unstable Richtmyer-Meshkov Growth in Solid and Liquid Metals in Vacuum // J. Fluid Mech. 2012. 703. 60–84.
2. O'Rourke P. J., Amsden A. A. The TAB Model for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup / Los Alamos National Laboratory report no. LA-UR-87-2105 (revised), 1987.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ЧИСЛЕННЫХ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ И ГЕОМИГРАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ

*И. Л. Хархордин, И. В. Горев<sup>1</sup>, В. В. Горев<sup>1</sup>*

НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой  
научный центр ВНИМИ, г. Санкт-Петербург  
<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

На протяжении последних двух десятилетий в практике гидрогеологических исследований все большую роль начинает играть численное моделирование. Так, если в 80-ых годах прошлого века разработкой численных моделей гидрогеологических процессов занимались всего несколько научных организаций, то сейчас численное моделирование используется во многих проектных институтах, на горно-добывающих предприятиях и в геолого-разведочных и изыскательских организациях. Произошел быстрый рост рынка программного обеспечения в соответствующей области. Также в указанный период продолжался экспоненциальный рост производительности вычислительной техники. Существенные изменения произошли и в требованиях к программному обеспечению. Они коснулись как интерфейса пользователя, так и вычислительных возможностей программ.

В плане интерфейса пользователя произошла смена нескольких поколений программ. До последнего времени графический интерфейс пользователя строился по принципу Препроцессор-Вычислитель-Постпроцессор. Единственной задачей Препроцессора была подготовка файлов исходных данных в графическом режиме, а Постпроцессора – экстракция и визуализация результатов счета. Программные комплексы для численного моделирования были, как правило, лишены инструментов для работы с первичной гидрогеологической информацией. Это предполагает, что информация поступает к расчетчикам в уже подготовленном для создания модели формате. Такая структура программ удобна, когда расчеты выполняет сторонняя организация или специальный отдел. Тем не менее такая организация программ затрудняет их использование для выполнения оперативных расчетов, необходимых, например, при анализе данных мониторинга или при возникновении аварийных ситуаций на горных предприятиях. Перспективным направлением дальнейшего развития программного обеспечения для гидрогеологических расчетов является разработка комплексных систем, организующих не только выполнение численных расчетов, но и работу с первичной информацией.

С точки зрения вычислительных возможностей важным требованием к гидрогеологическим программам является возможность учета взаимодействия гидрогеологической системы с гидрогеологическими объектами различных типов. Под гидрогеологическими объектами далее мы будем понимать природные тела или инженерные сооружения, оказывающие влияние на формирование водного баланса, а также тепловых и массовых потоков в пределах расчетной области, но не яв-

ляющиеся при этом ее частью. Сопряжение гидрогеологических объектов с расчетной сеточной областью реализуется через задание на них внутренних граничных условий.

На протяжении последних нескольких лет разрабатывался пакет прикладных программ NIMFA для моделирования различных гидрогеологических процессов. NIMFA позволяет решать задачи фильтрации подземных вод и переноса загрязняющих веществ в трехмерной постановке на неравномерных многофрагментных сетках с использованием методов конечных разностей.

Наиболее часто встречающимися в практических задачах гидрогеологическими объектами являются (выделены ГО, реализованные в пакете НИМФА):

- реки;
- озера (водохранилища);
- родники (источники);
- дрены;
- земная поверхность;
- болота;
- инфильтрация;
- зона аэрации;
- скважины;
- подземные горные выработки (шахты, штольни);
- открытые горные выработки (карьеры).

По мере развития НИМФА будет дополняться как по набору объектов, так и по новым опциям для их связи с моделируемой областью. Отдельные гидрогеологические объекты могут иметь свои собственные внутренние модели, которые используются для корректировки внутренних граничных условий в расчетной области (например, перерасчет уровня в водоеме на основе модели формирования его водного баланса) или позволяют оптимизировать режим работы самого объекта (например, подобрать насосное оборудование для скважины).

## **УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЯ И ОКСИДА УРАНА В ВОЛНАХ УДАРНОГО СЖАТИЯ И АДИАБАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ**

*К. В. Хищенко*

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Для численного моделирования физических процессов при высокой концентрации энергии необходимо знание уравнения состояния различных веществ в широком диапазоне плотностей и давлений. Точность результатов расчетов в основном определяется адекватностью описания термодинамических характеристик среды. В настоящей работе представлены широкодиапазонные многофазные уравнения состояния алюминия и оксида урана  $U_3O_8$ . Расчеты проведены на основе полуэмпирической модели термодинамического потенциала свободной энергии с учетом полиморфных фазовых переходов, плавления и испарения. Результаты расчетов хорошо согласуются с имеющимися данными экспериментов с волнами ударного сжатия и адиабатической разгрузки.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*М. Г. Храмченков, Э. М. Храмченков*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

Анализ состояния дел в механике пористых сред, являющейся теоретической базой таких наук, как гидрогеомеханика, механика горных пород, механика грунтов, а также успешно применяемой при моделировании некоторых процессов в живых системах (тромбозис и лизис, процессы в почках и ряд других), показывает, что в настоящий момент отсутствует полноценное теоретическое описание сложных неравновесных процессов, протекающих в гео- и биосистемах. К таким процессам относятся, например, процессы метаморфизации горных пород и сопутствующие им изменения напряженно-деформированного состояния и термического состояния горных пород, в ходе которых имеют место химические превращения твердых и жидких компонентов пород и растворов, выделение или поглощение тепла, фазовые переходы, разрушение или преобразование твердого вещества горных пород и т. д. В биосистемах в качестве примеров могут быть указаны сложные процессы, протекающие при перерождении нормальной ткани в злокачественную и дальнейшее деление клеток ткани в виде злокачественной опухоли (процессы изучались на примере глиобластомы мозга). Важную роль при этом играет необходимость учета изменения плотности условно твердой фазы при фазовых превращениях в ходе процессов межфазного массообмена. Для решения таких задач требуется последовательное построение новых моделей физико-химической механики пористых сред, являющихся продолжением того теоретического фундамента гидрогеодинамики, который был заложен в трудах В. Н. Николаевского, В. М. Шестакова, А. В. Костерина, О. Кусси и ряда других [1–3]. Настоящая работа посвящена поиску новых подходов к построению таких моделей. В итоге удастся доказать, что существуют три класса моделей, первый из которых описывает процессы фильтрации химически инертных флюидов в деформируемых пористых средах (модель Био), второй дает комплексное описание процессов диагенеза, а третий – катагенеза в геологии. В биологии модель удачно описывает процесс развития глиобластомы мозга.

Рассматривалась трехмерная задача о фильтрационном массообмене в деформируемой пористой среде с пористым скелетом переменной массы. Расчет проводился с учетом нестационарного напряженно-деформированного состояния пористой среды. Моделировались ситуации, имитирующие различные природные ситуации. В геологических системах изучалось образование флюидного слоя в ходе процессов метаморфизма, внедрение плутонов в целостный массив, трещинная фильтрация гидротерм с преобразованием вещества вмещающих пород. Для вычисляемых величин концентрации, смещений, пористости и объема твердой фазы использовались граничные условия второго рода на всей границе области моделирования. Для аппроксимации системы дифференциальных уравнений использовался метод конечных разностей в сочетании с неявной разностной схемой. Полученные системы линейных алгебраических уравнений решались итерационными методами на каждом временном шаге. Перед непосредственным решением систем проводилось предобуславливание матрицы системы линейных алгебраических уравнений. Для предобуславливания матриц использовались методы Якоби и верхней релаксации.

### Литература

1. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996.
2. Coussy O. Poromechanics. Wiley, 2004.
3. Храмченков М. Г. Элементы физико-химической механики природных пористых сред. Казань: Казан. мат. общество, 2003.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СЕМЕЙСТВА 8-УЗЛОВЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К РЕШЕНИЮ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Д. Т. Чекмарев, С. В. Спириин

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

В [1] предложен метод построения схем МКЭ решения плоских задач теории упругости путем проектирования на плоскость трехмерной ажурной схемы [2–4].

Обобщая данный подход (см. [5]), можно построить семейство 8-узловых схем МКЭ решения трехмерных задач теории упругости, близких к схеме 8-узлового полилинейного КЭ.

Для построения схемы рассматривается расширение задачи теории упругости на 7-мерное пространство. Определим тензор деформаций в  $R^7$  как обобщение соотношений Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad i, j = 1, \dots, 7.$$

Связь напряжений и деформаций установим на основе «закона Гука»:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, 7.$$

7-мерные «уравнения равновесия теории упругости» в перемещениях запишутся в виде, аналогичном системе уравнений Ламе

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} u + \mu \Delta u + \rho F = 0,$$

где градиент, дивергенция и оператор Лапласа определены соответственно в  $R^7$ . Построение ажурной схемы МКЭ в  $R^7$  на основе линейного конечного элемента не представляет трудностей. Для построения трехмерной схемы положим во всех узлах сетки  $u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = 0$ , в результате после проектирования в трехмерное пространство получим искомую схему МКЭ.

Таким образом, в результате проектирования в  $R^3$  ажурной схемы построено 4-параметрическое семейство численных схем МКЭ решения трехмерной задачи теории упругости. В качестве параметров схемы выступают шаги исходной 7-мерной сетки по координатам  $x_4, x_5, x_6, x_7$ , равные соответственно  $h_4, h_5, h_6, h_7$ .

Возникает проблема оптимального подбора параметров конечных элементов в зависимости от их размеров, формы и других особенностей решаемых задач теории упругости. Обсуждается вопрос о применении к ее решению нейросетевых технологий [6].

Приводятся результаты решения статических и динамических тестовых задач, сравнение по точности и эффективности с численными решениями на основе традиционных схем МКЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-01-97052 р\_поволжье\_а и 14-01-00660 а).

### Литература

1. Чекмарев Д. Т., Гладильщикова К. М. Об одном классе двумерных схем МКЭ // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2006. Вып. 68. С. 236–242.
2. Чекмарев Д. Т. Численные схемы метода конечного элемента на «ажурных» сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 2. С. 49–54.

3. Жидков А. В., Зефиоров С. В., Кастальская К. А., Спиринов С. В., Чекмарев Д. Т. Ажурная схема численного решения трехмерных динамических задач теории упругости и пластичности // Вестник ННГУ. Н. 2011, № 4. Ч. 4. С. 1480–1482.

4. Жидков А. В., Спиринов С. В., Чекмарев Д. Т. Ажурная схема метода конечных элементов решения статических задач теории упругости // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2012. Т. 154. Кн. 4. С. 26–32.

5. Чекмарев Д. Т. Об одном способе построения двумерных 4-узловых и трехмерных 8-узловых конечных элементов для решения задач теории упругости // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2013. Т. 155. Кн. 3. С. 150–158.

6. Васильев А. Н., Тархов Д. А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

## ДИНАМИЧЕСКОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРЕПРОЦЕССОРА С ПОМОЩЬЮ ЯЗЫКА XML SCHEMA ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

*А. Д. Черевань, А. Г. Надуев, Д. А. Кожяев*

Центр компетенций и обучения, г. Саров

При разработке современных комплексов математического моделирования одним из критических требований является возможность быстрой адаптации препроцессора и счетного модуля к меняющемуся множеству моделируемых объектов и их параметров при модификации или создании новых расчетных методик. Подобная адаптация, как правило, приводит к существенной переработке всех частей комплекса, поскольку затрагивает базовую структуру данных, которая связывает все модули комплекса.

В связи с этим возникла необходимость разработать систему динамического конфигурирования комплекса, которая позволила бы без значительных расходов на программную адаптацию иметь состояние комплекса, отвечающее последним требованиям по структуре данных.

Для решения этой задачи была разработана система динамического управления интерфейсом препроцессора и конфигурирования данных комплекса с помощью языка XMLSchema. XMLSchema позволяет описать структуру XML-документа, который логично использовать в качестве формата файлов для варианта расчетной задачи комплекса и проекта препроцессора комплекса.

Для связи XMLSchema с комплексом на базе библиотеки с открытыми исходными кодами Xerces был разработан синтаксический анализатор, позволяющий преобразовывать основные логические блоки языка XMLSchema в набор базовых классов языка C++. Далее, используя этот набор, имеется возможность динамически строить древовидные структуры данных любой степени сложности. При этом новая структура данных комплекса может быть получена без перекомпиляции исходных кодов, а только посредством внесения изменений в схему XML.

Реализация данного подхода позволяет получить следующие преимущества, используя единую схему XML:

- задавать и осуществлять проверку целостности структуры файлов варианта расчетной задачи и проекта препроцессора комплекса;
- задавать структуру данных препроцессора комплекса без перекомпиляции исходных кодов;
- конфигурировать графический интерфейс препроцессора комплекса;
- экономить программные ресурсы на разработке и обслуживании сервисных функций структуры данных;

- при использовании универсального диалога пользователя, всегда работать с актуальной структурой данных комплекса, не исключая возможности разработки на финальной стадии проекта, специализированных диалогов, учитывающих расширенную информацию о природе данных;
- использовать большой набор готовых профессиональных инструментов для удобной и наглядной разработки XMLсхемы.

Данная система динамической конфигурации на базе языка XMLSchema 1.0 была использована в последних версиях программного комплекса Нимфа.

## КОМПОНЕНТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ КОМПАНИИ ALTERA CORPORATION

*Д. В. Чернов*

Вятский государственный университет, г. Киров

Основой цифровой системы в различных областях человеческой деятельности, как правило, является микропроцессор. Это или универсальный процессор, или цифровой сигнальный процессор DSP (Digital Signal Processor). Идея интеграции устройств различного назначения в единой системе привела к появлению микроконтроллеров. В отличие от микропроцессора, серийно выпускаемые микроконтроллеры обладают большим набором периферийных устройств.

Дальнейшим развитием идеи интеграции различных устройств в одной системе стало понятие «система на кристалле» SoC (system-on-chip). Идея SoC – объединить в одном кристалле как можно большее количество элементов цифровой системы. В итоге такие системы приобретают характеристики, присущие как микроконтроллерам, так и процессорам. Увеличение логической емкости ПЛИС приводит к тому, что они становятся полноправными конкурентами при реализации SoC. В программной реализации система на кристалле получила аббревиатуру SoPC (система на программируемом чипе).

Основная идея создания SoPC состояла в том, чтобы дать разработчику полный набор стандартных средств, имеющихся у DSP и микроконтроллеров плюс дополнительный объем кристалла и необходимый сервис для реализации своих схемных решений. Ядром всей системы может являться встраиваемый RISC-процессор Nios II. Nios II – программное процессорное ядро, описанное на языке программирования аппаратуры и предназначенное для реализации в ПЛИС фирмы Altera.

При этом необходимо учитывать, что для создания «системы на кристалле» к процессорному ядру необходимо добавить дополнительные компоненты – память, порты ввода/вывода, таймер, необходимые интерфейсы, что приводит к использованию дополнительных логических элементов (LE), которые могут более конструктивно использоваться при разработке специализированных систем. Например, только ядро NIOS II/f задействует около 3000 LEs [Nios II Processor Reference Handbook]\*, а модуль отладки JTAG 4 уровня задействует 3100 – 3700 LEs [Nios II Processor Reference Handbook].

Таким образом, наличие процессора с поддержкой периферийных устройств, памяти и возможностью интерактивной отладки позволяет обойти необходимость разработки управляющего процессора и использовать под разрабатываемый проект весь объем матрицы FPGA.

---

\*Nios II Processor Reference Handbook [Electronic resource]. Mode of Access: [http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpu\\_nii5v1.pdf](http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpu_nii5v1.pdf)

## КОМПЛЕКСНЫЕ РАСЧЕТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАНЕВРЕННОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛЕТА

*Д. В. Чирков, Д. А. Гудилин, Д. О. Алимов*

Филиал ОАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого», г. Москва

Современные программные комплексы, предназначенные для расчета аэродинамических характеристик летательных аппаратов позволяют проводить моделирование различных условий возникающих в ходе полета. Рост производительности вычислительных систем и постоянное увеличение объема оперативной памяти позволяет решать задачи в области вычислительной аэродинамики, недоступные еще несколько лет назад.

В данной работе представлены результаты расчетов, которые проводились в рамках валидации программного комплекса ЛОГОС (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). Использовались неструктурированные гексагональные расчетные сетки с усеченными элементами и пограничным слоем. Размер расчетных сеток от 15 до 40 миллионов ячеек.

В ходе работы были выполнены расчеты для следующих случаев:

1. Расчет интегральных аэродинамических характеристик ЛА в исходной конфигурации на крейсерских режимах полета с учетом и без учета влияния силовой установки.
2. Расчет интегральных аэродинамических характеристик ЛА при отклоненных органах управления
3. Расчет интегральных аэродинамических характеристик ЛА с грузами в транспортном положении на крейсерских режимах полета.
4. Расчет интегральных аэродинамических характеристик ЛА на режиме дозаправки.
5. Расчет нестационарных аэродинамических характеристик ЛА на больших углах атаки.
6. Расчет изменения аэродинамических характеристик ЛА под воздействием порыва ветра.

Анализ показывает хорошее совпадение полученных расчетных данных с результатами экспериментов.

## ДЕКЛАРАТИВНО-МОДУЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MOLOCH

*А. М. Чупрунов, Ф. А. Сапожников, А. В. Климов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики, г. Снежинск

В РФЯЦ-ВНИИТФ создан программный комплекс Moloch [1], реализующий метод классической молекулярной динамики. Этот комплекс постоянно развивается на всех этапах численного моделирования от подготовки данных до анализа результатов. Для комплекса создаются новые алгоритмы [2], запуск которых требует задания значений дополнительных параметров моделирования. Для этого в графическом интерфейсе пользователя комплекса Moloch добавляются новые пользовательские элементы. От способа представления пользовательских элементов зависит трудоемкость добавления новых элементов и параметров моделирования.

В докладе рассматривается такое представление элементов графического пользователя, при котором разработчик нового алгоритма может самостоятельно добавлять в графический интерфейс программного комплекса Moloch новые пользовательские элементы. Для этого элементы графического интерфейса Moloch снабжаются декларативным описанием, в котором на языке QML (Qt Meta-Object Language) [3] записаны спецификации использования модулей внешнего вида и параметров моделирования. Модули внешнего вида являются частью кроссплатформенной технологии QtQuick (Qt User Interface Creation Kit) [3]. Модули параметров моделирования являются частью предметной области программного комплекса Moloch. Модули разработаны на языке C++ и доступны для операционных систем семейств Windows и Linux.

### Литература

1. Sapozhnikov F. A., Dremov V. V., Ionov G. V., Derbenev I. V., Chizhkova N. E. MOLOCH computer code for molecular-dynamics simulation of processes in condensed matter // EPJ Web of Conferences 10, 00017, 2010.
2. Чупрунов А. М., Сапожников Ф. А., Федорова Т. Б., Ребенок Е. Н., Зуева Л. М. Параллельное построение поликристаллических образцов наноматериалов по заданной геометрии для моделирования методом молекулярной динамики // Материалы международной конференции «Parallel and Distributed Computing Systems» PDCS 2013 (Украина, Харьков, март 13–14, 2013)
3. Digia. Introduction to application development with Qt Quick. Release 1.0. February 28, 2013.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ СЛАУ

*В. Л. Якушев, А. В. Филимонов, П. Ю. Солдатов, А. В. Киселева*

Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва

В данной работе представлен способ ускорения работы прямого решателя, реализующего разложение Холецкого и эффективно использующего директивы OpenMP путем выполнения наиболее ресурсоемких операций на графических процессорах (GPU). Профилирование решателя показало, что 80–90 % времени факторизации занимает умножение небольших матриц. Однако умножение матриц на графических ускорителях может происходить во много раз быстрее, чем на многоядерных центральных процессорах [1, 2].

В решателе используется интерфейс BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms). В то же время существует библиотека cuBLAS, которая реализует тот же интерфейс. Она адаптирована для GPU и входит в стандартный комплект разработки CUDA Toolkit, поставляемый компанией nVidia [3]. Таким образом, можно динамически подключить две библиотеки, оптимизированные для разных архитектур.

Для внедрения cuBLAS в работу решателя потребовалось разработать набор функций, которые устраняют отличия в обращении к BLAS и cuBLAS (например, в передаваемых типах данных) и корректно осуществляют передачу данных между вычислительными мощностями [4]. Следует отметить, что выполнение других функций библиотеки BLAS на небольших размерах входных массивов не даст существенной прибавки в скорости.

Эффективность сильно зависит от оборудования, поэтому очень важен алгоритм автоматической настройки решателя под конкретную конфигурацию. Любое обращение к GPU занимает дос-

таточно много времени. Так, перенаправление абсолютно всех операций умножения матриц не ускоряет, а замедлит работу решателя, поскольку будет затрачено слишком много времени на переписывание данных. Поэтому был установлен размер матриц, превышение которого делает выгодным выполнение задания на GPU. Кроме того, нужно следить, чтобы из этих заданий не образовались очереди.

Передача данных между CPU и GPU также является узким местом. Было установлено, что передавать умножаемые матрицы выгоднее после помещения их в один указатель. С целью улучшения взаимодействия вычислительных устройств была применена pinned-память – прикрепленный буфер в оперативной памяти, который может быть помещен в память GPU быстрее, чем обычный участок памяти. Каждая матрица, которую нужно записать на GPU, сначала помещается в pinned-массив и только затем копируется на GPU. Обратное копирование также происходит через pinned-память.

Работа решателя, и в том числе подготовка заданий для GPU, происходит во многих параллельных потоках CPU. Таким образом, актуально использовать способы распараллеливания на самом графическом процессоре [5]. Благодаря cuda streams удается выполнять на видеокарте несколько операций умножения одновременно: каждый отпр-поток создает свой поток на GPU, и некоторые команды выполняются асинхронно. Однако необходимо подбирать ограничение на количество потоков на графическом процессоре в зависимости от его характеристик.

Для настройки алгоритма, проверки правильности и оценки эффективности его работы был подобран набор симметричных разреженных матриц большой размерности, полученных при решении задач строительной механики методом конечных элементов. Численные эксперименты были проведены для различных конфигураций оборудования.

В итоге перенаправление части вычислений на графические ускорители позволило уменьшить время работы решателя в 1,5–2,5 раза в зависимости от конфигурации используемого оборудования. В дальнейшем планируется разработать эффективные алгоритмы умножения матриц, а также адаптировать данный подход для GPU других производителей. После тестирования решатель планируется использовать в расчетных программных комплексах.

## Литература

1. Cullinan C., Wyant C., Frattesi T. Computing Performance Benchmarks among CPU, GPU, and FPGA. [Electronic resource]. Mode of Access: <http://www.wpi.edu/>.
2. Tan G., Li L., Triechle S., Phillips E., Bao Y., Sun N. Fast implementation of DGEMM on Fermi GPU // Proceedings of 2011 International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, ACM, New York, NY, USA. P. 35:1–35:11.
3. CUBLAS Library User Guide. // NVIDIA Corporation. [Electronic resource]. Mode of Access: <http://developer.nvidia.com/>.
4. Якушев В. Л., Филимонов А. В., Солдатов П. Ю. Методика повышения эффективности решателей СЛАУ с использованием графических ускорителей // Вестн. кибернетики. 2013, № 12. С. 169–173.
5. CUDA C Best Practices Guide. // NVIDIA Corporation [Electronic resource]. Mode of Access: <http://docs.nvidia.com/>.

## РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА КАСКАДНОГО СБОРА ГЛОБАЛЬНОГО УРОВНЯ В МНОГОСЕТОЧНОМ РЕШАТЕЛЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС

*А. В. Ялозо, А. С. Козелков, Д. П. Силаев, С. В. Лашкин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Неявная дискретизация основной системы вычислительной гидродинамики – системы уравнений Навье–Стокса, порождает систему разностных уравнений, которая в основном решается итерационными методами. При этом классические итерационные методы либо перестают работать, либо дают очень медленную скорость сходимости. Одним из методов решения данной проблемы является использование алгебраического многосеточного метода, основанного на использовании последовательности вложенных сеток и операторов перехода от одной сетки к другой.

В Институте теоретической и математической физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается программный комплекс инженерного анализа ЛОГОС, предназначенный для расчета задач гидродинамики, аэродинамики теплопереноса и распространения тепла в твердотельной конструкции на произвольных неструктурированных сетках.

В текущей версии комплекса для решения СЛАУ используется собственная реализация многосеточного метода. Разработанный ранее в рамках данного решателя последовательный алгоритм сбора матрицы глобального уровня позволил получить значительное ускорение решения СЛАУ, но, в то же время, данная реализация имеет существенные ограничения на максимально возможный размер матрицы СЛАУ: суммарный объем объединяемых уровней не должен превышать объема памяти одного узла вычислительного кластера, на котором производится расчет. Кроме того, ввиду роста размерности задач, и, соответственно, роста числа узлов, требуемых для решения задачи, растет и время, затрачиваемое на построение и последующее огрубление глобального уровня в скалярном режиме.

В данном докладе представлен алгоритм, устраняющий недостаток скалярной реализации построения глобального уровня – отсутствие масштабируемости. Для этого в рамках реализованного ранее многосеточного метода в пакете программ ЛОГОС был разработан и реализован алгоритм «каскадного сбора» глобального уровня.

В работе приводятся описание и особенности реализации данного алгоритма; а также результаты расчета тестовых задач с целью оценки масштабируемости и эффективности предложенного подхода. Исследуются оптимальные параметры каскада для задач различной размерности.

## ОБЗОР СЕМЕЙСТВА МАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЛИВЕРМОРСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИМЕНИ ЛОУРЕНСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

*А. Дж. Янг, А. Д. Уайт, Я. Б. Яведани, К. С. Андерсон, Д. А. Герц, Д. Б. Райзман<sup>1</sup>*

Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, Калифорния, США  
<sup>1</sup>Сандийские национальные лаборатории, Альбукерк, Нью-Мексико, США

За последнее десятилетие в Ливерморской национальной лаборатории было разработано семейство взрывомагнитных генераторов (MFSG) для исследования уравнений состояния и исследований в области физического материаловедения. В это семейство входит универсальная испыта-

тельная платформа (FFT), состоящая из последовательно соединенных спирального и коаксиального магнитных генераторов, которая экспериментально показала ток 100 МА в нагрузках малой индуктивности (несколько наногенри). Платформа Mini-G (MG), вдвое меньшего масштаба версия платформы FFT, способна создавать ток, по крайней мере, 40 МА в индуктивной нагрузке всего несколько наногенри. Система из последовательно соединенных спирального и плоского магнитных генераторов (Flat Plate Generator (FPG)) обеспечивает ток 10 МА (или более) в индуктивных нагрузках того же порядка, что и в MG платформе. В статье представлен обзор конструкций магнитных генераторов, используемых в этих платформах, а также результаты моделирования и расчетов, которые использовались при их разработке. В статье представлены и обсуждаются экспериментальные данные и кривые тока, полученные в ходе недавно проведенных экспериментов, которые иллюстрируют работу и эффективность магнитных генераторов. Обсуждаются также некоторые практические аспекты использования взрывчатых веществ (ВВ), включая проблему выбора ВВ для магнитного генератора и введения ВВ в эксперимент; в частности, обсуждаются последствия возникновения воздушных зазоров в ВВ при подготовке центральной трубы для спиральных магнитных генераторов. Кроме того, дано подробное описание использования PDV (Photonic Doppler Velocimetry) диагностики для измерения динамики (разлета) центральной трубы магнитного генератора, и проводится сравнение с результатами прогнозных расчетов.

Работа выполнена Ливерморской национальной лабораторией под эгидой Министерства энергетики США в рамках контракта DE-AC52-07NA27344.  
LLNL-ABS-649893

## КОД ЭГИДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

*Ю. В. Янилкин, С. П. Беляев, В. Ю. Колобянин, А. В. Городничев, А. Р. Гужова,  
Л. И. Дегтяренко, Н. П. Интяпина, В. Г. Куделькин, С. А. Линяев, Д. В. Логинов,  
А. Л. Потехин, Е. В. Потехина, А. С. Разумков, А. Л. Стадник, В. И. Тарасов,  
О. О. Топорова, И. Ю. Турутина, В. М. Шабуров*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Код ЭГИДА, разработанный в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», предлагается для выполнения расчетно-теоретических исследований в фундаментальных и прикладных областях науки и для преподавания в ВУЗах страны. Он предназначен для моделирования двумерных и трехмерных задач, прежде всего связанных с ударно-волновыми течениями многокомпонентной среды. Код реализован на высокопараллельных ЭВМ, базируется на передовых научно-методических положениях и методах, разработанных в математическом отделении «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Основные элементы кода ЭГИДА:

- решатель, включающий в себя программы расчета газодинамических течений сжимаемой среды с учетом сопутствующих процессов, таких как упругопластика, детонация и горение ВВ, разрушение и фрагментация материалов, турбулентное перемешивание и др. ;
- препроцессор, представляющий собой программы для расчета начальных данных;
- постпроцессор – программы для обработки и визуализации результатов расчетов.

Код обладает особенностями, выделяющими его среди известных аналогов. Это использование неподвижной адаптивно-встраиваемой счетной сетки; высокоточные оригинальные методы расчета движения контактных границ; замыкающие соотношения, ориентированные на отечествен-

ные материалы; широкий набор моделируемых процессов и решаемых задач; русскоязычный интерфейс; наличие возможности программирования дополнительных счетных модулей; почти полная самодостаточность кода, для его работы требуются лишь САД системы; невысокая стоимость программного продукта.

Основные классы решаемых по коду задач:

- формирование компактных элементов;
- формирование кумулятивных струй;
- пробивание и соударение различных конструкций с преградами;
- разрушение и фрагментация элементов конструкций;
- определение поражающего действия взрывов в различных средах;
- турбулентные течения жидкостей и газов, истекание газов из резервуаров;
- лабораторные опыты по исследованию ВВ, моделей разрушения и др.

Классы задач не ограничиваются данным списком, он может быть расширен за счет возможности дополнительного программирования непосредственно пользователями кода.

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В РОТОРЕ МОДЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ ИГУАССУ**

*Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, Ю. Д. Чернышев, О. О. Топорова, В. Ю. Колобянин,  
И. Ю. Турутина, С. П. Беляев, А. С. Дмитриева*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В докладе рассматриваются задачи обтекания газоотборника в отборной камере газовой центрифуги (ГЦ) рабочим газом – гексафторидом урана  $UF_6$ . Для решения этой задачи предложена физико-математическая модель и численная методика, в которой учитывается газодинамическое движение рабочего газа, а также конвективный перенос тепла в нем. В модели рассматривается полная (с учетом теплопроводности) модель теплопереноса в газе и отборнике, а также вязкого теплообмена между газом и стенками ГЦ.

Методика реализована в рамках кода ЭГАК. Были модифицированы, разработаны и реализованы следующие программы:

- Программа расчета движения вязкого газа.
- Программа сглаживания скоростей с учетом сохранения момента импульса.
- Программа расчета теплопроводности с учетом граничных условий.
- Программа расчета диффузии компонентов.
- Программа, реализующая циклические граничные условия.
- Программы, реализующие втекание и вытекания газа через кольцевые щели в диафрагмах и в блоке питания.
- Программы расчета цилиндрических сеток и начальных данных на этих сетках.
- Программа построения внешней части реального отборника.
- Программы распараллеливания и связи областей 3D и 2D течений (отборная и разделительная камеры) и др.

Приводятся результаты расчетов нескольких модельных задач, которые находятся в удовлетворительном согласии с известными или полученными в данной работе аналитическими решениями.

**Супервычисления  
и математическое моделирование**

XV Международная конференция

13–17 октября 2014 г.

Под редакцией  
доктора физ.-мат. наук  
Р. М. Шагалиева

Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. Н. Фролова*

Печатается с оригинальных текстов авторов

---

Подписано в печать 19.09.2014      Формат 60×84/8  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,8      Уч. изд. л. ~14,8  
Тираж 185 экз.      Зак. тип. 1574-2014

---

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23