

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ ИМ. М.А. ЛАВРЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Всероссийская конференция
с международным участием, посвященная 60-летию
Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД И ФИЗИКИ ВЗРЫВА

4-8 сентября 2017 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Новосибирск
2017

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ ИМ. М. А. ЛАВРЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
"СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С
МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД И ФИЗИКИ ВЗРЫВА

*посвященная 60-летию Института гидродинамики
им М. А. Лаврентьева СО РАН*

4 – 8 сентября 2017 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск
2017

Программный комитет:

Титов В. М., академик — сопредседатель (Новосибирск)
Головин С. В., д. ф. - м. н. — сопредседатель (Новосибирск)
Рудой Е. М., д. ф. - м. н. — заместитель председателя (Новосибирск)
Прууэл Э. Р., к. ф. - м. н. — заместитель председателя (Новосибирск)
Данилова К. Н., к. ф. - м. н. — ученый секретарь (Новосибирск)
Протопопова Т. В., к. ф. - м. н. — ученый секретарь (Новосибирск)
Алексеев Г. В., д. ф. - м. н. (Владивосток)
Антонцев С. Н., профессор (Лиссабон, Испания)
Васильев А. А., д. ф. - м. н. (Новосибирск)
Гаврилюк С. Л., профессор (Марсель, Франция)
Гайфуллин А. М., чл. -корр. РАН (Москва)
Горячева И. Г., академик (Москва)
Ерманюк Е. В., д. ф. - м. н. (Новосибирск)
Индейцев Д. А., чл. -корр. РАН (Санкт-Петербург)
Канель Г. И., чл. -корр. РАН (Москва)
Кедринский В. К., д. ф. - м. н. (Новосибирск)
Коробкин А. А., профессор (Норвич, Великобритания)
Крайко А. Н., д. ф. - м. н. (Москва)
Ляпидевский В. Ю., д. ф. - м. н. (Новосибирск)
Михайлов А. С., д. т. н. (Снежинск)
Морозов Н. Ф., академик (Новосибирск)
Музыря А. К., к. т. н. (Саров)
Мулюков Р. Р., чл. -корр. РАН (Уфа)
Плотников П. И., чл. -корр. РАН (Новосибирск)
Псахье С. Г., чл. -корр. РАН (Томск)
Пухначев В. В., чл. -корр. РАН (Новосибирск)
Ребров А. К., академик (Новосибирск)
Суржиков С. Т., академик (Москва)
Уткин А. В., к. ф. - м. н. (Москва)
Фомин В. М., академик (Новосибирск)
Чесноков А. А., д. ф. - м. н. (Новосибирск)
Чупахин А. П., д. ф. - м. н. (Новосибирск)
Шагалиев Р. М., д. ф. - м. н. (Саров)

Всероссийская конференция с международным участием “Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва” посвящена 60-летию со дня основания Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. В ходе работы конференции будут представлены оригинальные сообщения по следующим научным направлениям:

- Математические проблемы механики сплошной среды;
- Физика и механика высокоэнергетических процессов;
- Механика жидкостей и газов;
- Механика деформируемого твердого тела.

Конференция проводится при поддержке Федерального агентства научных организаций, Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-01-20420), компании "Шлюмберже Сибирского отделения РАН, Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирского государственного университета, редколлегий журналов “Физика горения и взрыва” и “Прикладная механика и техническая физика”.

ISBN 5-94671-025-7

© Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

СОДЕРЖАНИЕ

АБАШЕВ В. М., ЕРЕМКИН И. В., ЖИВОТОВ Н. П., ЗАМУРАЕВ В. П., КАЛИНИНА А. П., ТРЕТЬЯКОВ П. К., ТУПИКИН А. В. <i>Исследование сверхзвукового истечения пересекающихся струй в полукрытом канале</i>	18
АБДУРАКИПОВ С. С., ХРЕБТОВ М. Ю., ДУЛИН В. М. <i>Применение методов пространственно-временной декомпозиции для анализа 3D полей скорости и давления в струйных течениях с закруткой</i>	19
АБЕНОВ М. М. <i>Об одном классе массовых сил, обеспечивающих разрешимость уравнений Навье–Стокса</i>	20
АДИЩЕВ В. В., ГРАЧЕВА М. С., КУЧЕРЕНКО И. В. <i>Определение жесткостных характеристик структурно неоднородных материалов с использованием детерминистической и нечеткой моделей</i>	21
АКСЕНОВ А. В. <i>Симметрии и фундаментальное решение уравнения трансверсально изотропной упругой среды</i>	22
АКТЕРШЕВ С. П., АЛЕКСЕЕНКО С. В. <i>Модель волнового ривулетного течения</i>	23
АЛАБУЖЕВ А. А. <i>Влияние неоднородности поверхности пластины на трансляционные колебания капли</i>	24
АЛАБУЖЕВ А. А., КАШИНА М. А. <i>Динамика полусферической капли маловязкой жидкости в электрическом поле</i>	25
АЛЕКСЕЕВ Г. В. <i>Проблема невидимости в акустике, электромагнетизме и теплопереносе</i>	26
АМОСОВА Е. В. <i>Точная локальная управляемость течением вязкого газа</i>	27
АНДРЕЕВ В. К., ЧЕРЕМНЫХ Е. К. <i>Слоистое термокапиллярное движение двух несмешивающихся жидкостей</i>	28
АНДРЕЕВ С. Г., АХМЕТШИН Р. М., БОЙКО М. М., ГРЯЗНОВ Е. Ф., КОЛПАКОВ В. И., МОЧАЛОВА В. М., НИКИТИНА Е. В., УТКИН А. В. <i>Исследование волнового этапа метания стальных оболочек и пластин низкоплотными зарядами ВВ</i>	28
АНИСИЧКИН В. Ф., ПРУУЭЛ Э. Р. <i>Уравнение состояния для моделирования мега взрывных процессов в планетах. Образование спутников</i>	29
АРАКЧЕЕВ А. С., ЛАЗАРЕВА Г. Г., МАКСИМОВА А. Г. <i>Математическое моделирование эрозии вольфрама при импульсном тепловом воздействии</i>	30
АРХИПОВ Д. Г., ХАБАХПАШЕВ Г. А. <i>Устойчивость двухслойного течения Пуазейля в закрытом плоском наклонном канале</i>	31
АФОНИН А. Г., БУТОВ В. Г., СИНЯЕВ С. В., СОЛОНЕНКО В. А., ШВЕЦОВ Г. А., НОСОВ Г. В., НОСОВА М. Г. <i>Компактный накопитель энергии для электромагнитных ускорителей твердых тел</i>	32
БАЙКИН А. Н., ГОЛОВИН С. В. <i>Математическое моделирование планарной трещины гидроразрыва в пороупругой среде</i>	33
БАНЩИКОВА И. А. <i>К оценке угла скручиваемого стержня из анизотропного при ползучести материала</i>	34
БАНЩИКОВА И. А., ЛЮБАШЕВСКАЯ И. В. <i>Длительность до разрушения осесимметрично нагруженных конструкций при ползучести</i>	35

БАТИЩЕВ В. А., ГЕТМАН В. А. <i>Возникновение вращения жидкости в пограничном слое при локальном охлаждении свободной границы</i>	36
БАТУЕВ С. П., РАДЧЕНКО А. В., РАДЧЕНКО П. А. <i>Исследование взаимодействия кумулятивного снаряда с полем осколков</i>	37
БАУТИН С. П., ДЕРЯБИН С. Л., КРУТОВА И. Ю., ОБУХОВ А. Г. <i>Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси</i>	37
БАУТИН С. П., НОВАКОВСКИЙ Н. С. <i>Численное решение задачи безударного сильного сжатия одномерных слоев газа с учетом условий на характеристике</i> . . .	39
БАШАРИН А. Ю., ДОЖДИКОВ В. С. <i>Особенности нехрупкого разрушения алмаза в условиях высокотемпературного нагрева</i>	40
БЕДАРЕВ И. А., ФЕДОРОВ А. В. <i>Математическое моделирование взаимодействия детонационной волны с инертными частицами на макро и микроуровне</i>	41
БЕКЕЖАНОВА В. Б., ГОНЧАРОВА О. Н. <i>Влияние термодиффузионных и гравитационных эффектов на свойства спектра возмущений течений испаряющейся жидкости</i>	42
БЕКЕЖАНОВА В. Б., ГОНЧАРОВА О. Н. <i>Режимы трехмерных термокапиллярных течений с испарением</i>	43
БЕЛОВА О. Н., СТЕПАНОВА Л. В. <i>Моделирование процесса роста трещины в условиях смешанного нагружения методом молекулярной динамики: численный эксперимент в пакете LAMMPS</i>	44
БЕЛЫХ В. Н. <i>Об эволюции конечного объема идеальной несжимаемой жидкости со свободной поверхностью</i>	45
БЕЛЯЕВ В. А. <i>Метод коллокации и наименьших невязок для решения бигармонического уравнения в неканонических областях</i>	46
БЕРДНИКОВ В. С., МИТИН К. А. <i>Влияние внутренних перегородок на нестационарный сопряженный теплообмен в модели авиационного бака после внезапного подвода тепла</i>	47
БЕРДНИКОВ В. С., МИТИН К. А., ВИНОКУРОВ В. В., ВИНОКУРОВ В. А., ГРИШКОВ В. А. <i>Ламинарно-турбулентные переходы при свободной конвекции в вертикальных плоском и кольцевом слоях жидкости</i>	48
БЕРДНИКОВ В. С., МИТИН К. А., ЧЕПУРОВ А. И. <i>Нестационарный сопряженный конвективный теплообмен в прямоугольной полости со стенками конечной теплопроводности после внезапного нагрева основания</i>	49
БИБЕРДОРФ Э. А., БЛОХИН А. М. <i>Обтекание кругового конуса реальным газом</i> . .	50
БЛОХИН А. М., СЕМЕНКО Р. Е. <i>Об одной модели вихревого движения несжимаемой полимерной жидкости в приосевой зоне</i>	51
БЛОХИН А. М., СЕМИСАЛОВ Б. В. <i>Численный анализ стационарных неизотермических течений полимерной жидкости в каналах различных форм</i>	51
БЛОХИН А. М., ТКАЧЕВ Д. Л. <i>Аналог течения Пуазейля для несжимаемой полимерной жидкости с объемным зарядом. Асимптотика спектра линеаризованной проблемы</i>	52
БОГАН Ю. А. <i>О фредгольмовости общей краевой задачи для эллиптического уравнения высокого порядка на плоскости</i>	53
БОГДАНОВ А. Н., ДИЕСПЕРОВ В. Н., ЖУК В. И. <i>Современные проблемы неклассического пограничного слоя</i>	54

Бойко А. В., Кириловский С. В., Нечепуренко Ю. М., Поплавская Т. В. Особенности перехода к турбулентности при продольном несимметричном обтекании прямого двугранного угла	55
Болеста А. В., Фомин В. М. Сравнительный анализ отклика металлов с различной кристаллической структурой на ударно-волновое нагружение	56
Борд Е. Е., Черевко А. А., Хе А. К., Панарин В. А., Орлов К. Ю., Чупахин А. П. Использование диаграмм Найквиста для анализа решений уравнения Ван дер Поля—Дуффинга, описывающего локальную гемодинамику мозга	57
Борзенко Е. И., Рыльцева К. Е., Фролов О. Ю., Шрагер Г. Р. Гидравлическое сопротивление в трубопроводе с затвором	58
Борзенко Е. И., Дьякова О. А. Граничные условия скольжение-прилипание на твердой стенке в случае течения степенной жидкости в T -образном канале	59
Борисов С. П., Кудрявцев А. Н. Численное моделирование нелинейной динамики одномерной пульсирующей детонации	60
Боронин С. А., Осипцов А. А., Дерош Ж. Вытеснение вязкопластических жидкостей в трещине гидроразрыва	61
Бризицкий Р. В. Исследование задач управления для стационарных уравнений МГД	62
Бризицкий Р. В., Сарницкая Ж. Ю. Обратные коэффициентные задачи для нелинейной модели массопереноса	63
Бродова И. Г., Наймарк О. Б., Петрова А. Н., Плехов О. А., Разоренов С. В., Шорохов Е. В. Влияние структуры ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов на механические свойства при динамическом сжатии и ударно-волновом нагружении	64
Будадин О. Н., Каледин В. О., Козельская С. О., Гилева А. Е. Приближенная модель термомеханических процессов в композитной броневой защите при ударе	65
Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация двухфазной смеси воздуха и керосина, барботированного водородом	66
Вановский В. В., Петров А. Г. Учет влияния силы Бассе на движение твердой частицы в стоячей акустической волне в жидкости	67
Васильев А. А. Задачи многофронтной детонации	68
Веденеев В. В., Зайко Ю. С. Самовозбуждающиеся колебания упругой трубки при протекании внутри нее жидкости на ламинарных и турбулентных режимах	69
Власова С. С., Просвиряков Е. Ю. Стационарная плоская конвекция при теплообмене на нижней и верхней границах вязкой несжимаемой жидкости	70
Воеводин А. Ф., Никифоровская В. С. Численные модели для расчета гидрологических процессов в системах открытых водотоков и водоемов	71
Волчков Ю. М. Неклассические модели теории пластин и оболочек	72
Воронин М. С. Упрощенный метод расчета параметров времени релаксации касательных напряжений на примере полимеров	72
Вячкин Е. С., Каледин В. О., Решетникова Е. В., Аульченко С. М. Численное моделирование несжимаемых слоистых структур	73

Вячкина Е. А., Вячкин Е. С. Математическое моделирование горения строительных объектов с учетом химического состава конструкционных материалов	75
Гаврилов Н. В., Ляпидевский В. Ю. Уединенные внутренние волны большой амплитуды в шельфовой зоне моря	76
Гаврилюк С. Л., Ляпидевский В. Ю., Чесноков А. А. Гиперболические и дисперсионные приближения теории мелкой воды в слоистых сдвиговых течениях неоднородной жидкости с массообменом	76
Гайфуллин А. М., Гаджиев Д. А., Зубцов А. В. Возникновение и диффузия вихрей	77
Гайфуллин А. М., Жвик В. В. Несимметричное отрывное обтекание параболического крыла	78
Георгиевский П. Ю., Левин В. А. Использование “тепловой иглы” для управления сверхзвуковым обтеканием тел	79
Георгиевский П. Ю., Левин В. А., Сутырин О. Г. Эффект фокусировки ударной волны при взаимодействии с цилиндрическим облаком пыли	80
Герасимов А. В., Пашков С. В., Христенко Ю. Ф. Ударное взаимодействие оболочек и элементов конструкции космических аппаратов с частицами космического мусора и микрометеороидов	81
Гилев С. Д. Малопараметрическое уравнение состояния меди, построенное на основе данных по статическому и ударному сжатию	82
Говердовский В. Н., Константинов А. П., Сухинин С. В., Трилис А. В., Юрковский В. С. Прохождение и отражение волн от границ полидисперсных контрастных фононных кристаллов	83
Головнев И. Ф., Головнева Е. И., МЕРЖИЕВСКИЙ Л. А. Исследование устойчивости наностержня методом молекулярной динамики	84
Гологуш Т. С., Черевко А. А., Петренко И. А., Остапенко В. В. Численное моделирование и оптимизация процесса эмболизации как задачи двухфазной фильтрации	85
Голушко С. К. Математическое моделирование, расчет и оптимизация композитных конструкций	86
Голушко С. К., Семисалов Б. В. Расчет и проектирование анизотропных цилиндрических оболочек из углепластика	87
Голых Р. Н. Моделирование воздействия кавитации на реологические свойства сред с несущей высокомолекулярной жидкой фазой	88
Голых Р. Н. Обоснование требований и разработка экспериментального стенда для исследования эффективности ультразвуковой интенсификации абсорбции	89
Гордеев В. В., Казутин М. В., Козырев Н. В. Влияние добавок на свойства нанотермита SiO/Al	90
Гордеева В. Ю., Люшнин А. В. Моделирование тонкой пленки полярной жидкости с ПАВ на границах раздела	91
Гороженинова Т. Н., Киченко А. А. Биомеханическое моделирование перестройки трабекулярной костной ткани	92
Грешилов А. Г., Сухинин С. В. Динамические воздействия на замороженную в круглую льдину опору, обусловленные собственными и квазисобственными колебаниями	93

ГРИГОРЬЕВ Ю. М. Аналитическое решение задачи Коши для уравнения Ламе	94
ГРИГОРЬЕВ Ю. Н., ЕРШОВ И. В. Влияние “вязкой” стратификации и колебательной неравновесности на устойчивость течения Куэтта двухатомного газа . . .	95
ГРЯЗНОВ Е. Ф. О пластичности стальных оболочек в условиях взрывного нагружения	96
ДЕМЬЯНКО К. В. Устойчивость течения Пуазейля в канале эллиптического сечения	96
ДЕНИСЕНКО Д. С., МАКАРЕНКО Н. И. Сверхкритические стратифицированные течения над неровным дном	97
ДЕНИСЕНКО Н. С., КУЛИК В. М., ЧЕРЕВКО А. А., ЧУПАХИН А. П. Аналитическое и экспериментальное исследование течений вязкой жидкости в упругом канале, моделирующем прямую артерию	98
ДОБРОСЕЛЬСКИЙ К. Г. Кавитационные структуры в следе поперечно обтекаемого цилиндра	99
ДОБРОХОТОВ С. Ю. Асимптотика решений у головного фронта линейной задачи Коши-Пуассона с локализованными начальными данными в бассейне с неровным дном	100
ДОБРОХОТОВ С. Ю., ТОЛЧЕННИКОВ А. А. Асимптотическое решение в окрестности фокальных точек переднего фронта для линейных уравнений волн на воде с локализованными начальными условиями	101
ДОВГАЛЬ А. В., ЗАНИН Б. Ю., СОРОКИН А. М. Экспериментальные исследования возникновения турбулентности на теле вращения	102
ДОЛГИХ В. С., СТЕПАНОВА Л. В., ТУРКОВА В. А. Цифровая фотоупругость: экспериментально-расчетное определение коэффициентов полного асимптотического разложения напряжений у вершины трещины	103
ДОЛГОЛЕВА Г. В., ЗЫКОВА А. И. Термоядерный коэффициент усиления и параметры быстрого зажигания мишеней ИГИС	104
ДУДИНА Д. В., УЛЬЯНИЦКИЙ В. Ю., БАТРАЕВ И. С., РЫБИН Д. К. Закономерности протекания химических реакций напыляемых материалов с компонентами газовой атмосферы при детонационном напылении	104
ЕГИТОВ А. В. Асимптотическое представление спектра линейной проблемы, описывающей течение вязкоупругой полимерной жидкости	105
ЕГОРОВ И. Е. О задаче Вraga для уравнения смешанного типа, не разрешенного относительно старшей производной	106
ЕГОРОВ И. Е., ЕФИМОВА Е. С., ТИХОНОВА И. М. О фредгольмовости первой краевой задачи для уравнения смешанного типа со спектральным параметром . . .	107
ЕРШОВ А. П., РУБЦОВ И. А., ПРУУЭЛ Э. Р. Детонация пористых взрывчатых веществ	107
ЖАПБАСБАЕВ У. У., БЕКИБАЕВ Т. Т., РАМАЗАНОВА Г. И. Оптимизация “горячей” перекачки нефтесмеси в магистральных нефтепроводах	109
ЗАГИДУЛИН А. Р., ПОДРУЖИН Е. Г., РАСТОРГУЕВ Г. И. Моделирование движения несвободной системы твердых тел с использованием уравнений Лагранжа первого рода	110
ЗАМУРАЕВ В. П., КАЛИНИНА А. П. Исследование влияния геометрии канала на процесс формирования околосзвуковой области в сверхзвуковом потоке при подводе энергии в канале переменного сечения	111

ЗАМУРАЕВ В. П., КАЛИНИНА А. П. <i>Трансзвуковое обтекание симметричного крылового профиля при двухмодовом одностороннем поверхностном воздействии</i>	112
ЗАРУБИНА О. В., БАСКАКОВ В. Д., КАРНАУХОВ К. А., КОРЕНЬКОВ В. В. <i>Особенности схлопывания кумулятивной облицовки с учетом разнотолщинности в поперечном сечении</i>	113
ЗАХАРОВА Ю. В., ФЕДОРОВА Н. Н., ФЕДОРОВ А. В. <i>Моделирование взрывов в помещениях различной конфигурации</i>	114
ЗАХАРЧЕНКО К. В., ТАЛАНИН А. В., МАКСИМОВСКИЙ Е. А. <i>Влияние технологий нанесения покрытия на деформационные характеристики металлического образца</i>	115
ЗЕЛЕПУГИН С. А., ИВАНОВА О. В., ЗЕЛЕПУГИН А. С., ЮНОШЕВ А. С. <i>Численное моделирование распространения и воздействия ударных волн в условиях взрывного синтеза</i>	116
ЗЕЛЕПУГИН С. А., ОРЛОВ М. Ю., ТОЛКАЧЕВ В. Ф. <i>Оценка эффективности применения керамик в защитных конструкциях при высокоскоростном ударе</i>	116
ЗЛОБИН Б. С., ШТЕРЦЕР А. А., КИСЕЛЕВ В. В., ШЕМЕЛИН С. Д. <i>Ударное компактирование сверхвысокомолекулярного полиэтилена</i>	117
ЗУБАРЕВА А. Н., СОСИКОВ В. А., УТКИН А. В. <i>Динамические свойства докозана при ударно-волновом воздействии</i>	118
ЗЮЗИНА Н. А., ОСТАПЕНКО В. В. <i>Численное моделирование растекания капли на горизонтальной плоскости</i>	119
ИВАНОВ О. О., ВЕДЕНЕЕВ В. В., КУЛИК В. М., БОЙКО А. В. <i>Исследование влияния податливых покрытий на трение в турбулентном пограничном слое</i>	120
ИГНАТЕНКО Я. С., БОЧАРОВ О. Б., МЕЙ Р. <i>Об условиях страгивания и отрыва с подложки частицы сдвиговым потоком неньютоновской жидкости</i>	121
ИСАЕНКОВ С. В., ЧЕРДАНЦЕВ М. В., ЧЕРДАНЦЕВ А. В., МАРКОВИЧ Д. М. <i>Исследование трехмерной волновой структуры пленки жидкости на начальном участке дисперсно-кольцевого течения</i>	122
ИЩЕНКО А. Н., ТАБАЧЕНКО А. Н., АФАНАСЬЕВА С. А., БЕЛОВ Н. Н., БУРКИН В. В., РОГАЕВ К. С., СКОСЫРСКИЙ А. Б., ЮГОВ Н. Т. <i>Исследование возможности повышения проникающей способности ударников из высокопористых сплавов путем легирования тугоплавкими соединениями</i>	123
ИЯВОЙНЕН С. В., БАНЩИКОВА И. А., ЛЮБАШЕВСКАЯ И. В., ЛЕГАН М. А. <i>Высокотемпературное деформирование стали 09Г2С в условиях нестационарной ползучести</i>	124
КАЗАКОВ А. Л., КУЗНЕЦОВ П. А., ЛЕМПЕРТ А. А. <i>Об одной специальной краевой задаче для нелинейного уравнения фильтрации</i>	125
КАЗАКОВ А. Л., ОРЛОВ Св. С., СПЕВАК Л. Ф. <i>Некоторые точные решения уравнения нелинейной фильтрации: построение и исследование</i>	126
КАЗАНЦЕВ С. Г. <i>Применение полиномиальных векторных полей для решения некоторых краевых задач в шаре</i>	127
КАПРАНОВ Ю. И. <i>Особенности моделирования многофазных фильтрационных потоков</i>	128
КАПУСТИН В. И., ЗАХАРЧЕНКО К. В. <i>Об исследовании диссипативных процессов при неупругом деформировании металлов</i>	128

КАРАБУТ Е. А., ЖУРАВЛЕВА Е. Н. <i>Особые точки в задаче Воиновых</i>	129
КАРПОВ Е. В., ДЕМЕШКИН А. Г. <i>Деформирование и разрушение гибридного композита стеклотекстолит-алюминий</i>	130
КАШИНА М. А., АЛАБУЖЕВ А. А. <i>Динамика капли жидкости в неоднородном электрическом поле</i>	131
КИРИЛОВСКИЙ С. В., ПОПЛАВСКАЯ Т. В. <i>Стабилизация гиперзвукового пограничного слоя с использованием волнистой поверхности</i>	132
КИРЮШКИН А. Е., МИНЬКОВ Л. Л. <i>Численное моделирование задач внутренней баллистики РДТТ с учетом прогара поверхности топлива</i>	132
КИСЕЛЕВ С. П., КИСЕЛЕВ В. П. <i>Численное моделирование растворения титана в расплаве алюминия</i>	133
КИСЕЛЕВ С. П., КИСЕЛЕВ В. П., ЗАЙКОВСКИЙ В. Н. <i>Нестационарные течения газа в радиальных соплах</i>	134
КЛИМЕНКО Л. С., МАРЫШЕВ Б. С. <i>Влияние осаждения примеси в рамках фрактальной модели на линейную устойчивость в концентрационном аналоге задачи Хортон-Роджерса-Лэвуда</i>	135
КОВРИЖНЫХ А. М., КОВРИЖНЫХ С. А. <i>Деформирование и разрушение материала в одномерных задачах ползучести</i>	136
КОВЫРКИНА О. А., ОСТАПЕНКО В. В. <i>Волновые течения, возникающие при подъеме бруса из воды</i>	137
КОЖЕВНИКОВА М. Е., РОТАНОВА Т. А., ВАЛОВ А. В. <i>Компьютерное моделирование плоских задач термоупругости: сравнительный анализ решений в связанной и несвязанной постановках</i>	138
КОЗЛОВ И. И., ОЧЕРЕТЯНЫЙ С. А., ПРОКОФЬЕВ В. В. <i>О влиянии акустических характеристик подводящего трубопровода на кавитационные автоколебания</i>	139
КОЛМАКОВА Т. В., РИКУН Ю. А. <i>Компьютерное моделирование механического поведения сегмента шейного отдела позвоночника и протеза межпозвоночного диска</i>	140
КОНОВАЛЕНКО И. С., ШИЛЬКО Е. В., ОВЧАРЕНКО В. Е., ПСАХЬЕ С. Г. <i>Компьютерное изучение особенностей деформации и разрушения наноструктурированных поверхностных слоев металлокерамического композита NiCr-TiC в условиях контактного взаимодействия</i>	141
КОНСТАНТИНОВ А. П., СУХИНИН С. В. <i>Особенности распространения волн, локализованных в окрестности двойной одномерно-периодической решетки пластин</i>	142
КОПЬЕВ В. Ф. <i>Неустойчивости вихревого кольца и переход к турбулентности</i>	143
КОПЬЕВ В. Ф., ЧЕРНЫШЕВ С. А., АКИНЬШИН Р. В., ЮДИН М. А. <i>Вихревое кольцо с изохронным профилем завихренности</i>	144
КОРНЕВ В. М. <i>О катастрофических разрушениях стальных конструкций при температурах ниже порога хладноломкости</i>	145
КОРОБЕЙНИКОВ С. Н., АЛЕХИН В. В., БАБИЧЕВ А. В. <i>Моделирование механических свойств графена силовым полем DREIDING</i>	146
КОРОСТЕЛЕВА Е. Н., КНЯЗЕВА А. Г. <i>Механизмы структурообразования в условиях управляемого синтеза композита Ti-TiC</i>	147
КРАТ Ю. Г., ПОТАПОВ И. И. <i>Задача о возникновении донных волн в напорном канале в двумерном приближении</i>	147

КРУТОВА И. Ю., КАЗАЧИНСКИЙ А. О., ОПРЫШКО О. В. Аналитическое и численное моделирование течений в придонных частях торнадо и тропического циклона	148
КРЮКОВА О. Н., КНЯЗЕВА А. Г., МАСЛОВ А. Л. Изучение динамики фазообразования в системах $TiNi+Si$ и $TiNi+Ta$ в неравновесных условиях воздействия потока электронов	149
КУДРЯВЦЕВ А. Н., ХОТЯНОВСКИЙ Д. В. Прямое численное моделирование развития неустойчивости и перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое	150
КУЗНЕЦОВ И. В., САЖЕНКОВ С. А. Квази-решения истинно-нелинейных p -ультрапараболических уравнений с переменным направлением времени	151
КУЗЬМИН Е. В., КУЗЬМИН С. В., ЛЫСАК В. И., ДОРОДНИКОВ А. Н. Формирование структуры и свойств соединений разнородных металлов при сварке взрывом с одновременным воздействием ультразвука	152
КУЛИКОВ И. М., ЧЕРНЫХ И. Г., ПРОТАСОВ В. А. Математическое моделирование МГД течений в межзвездной среде с учетом химокинетики водорода	153
КУЛИКОВСКИЙ А. Г., СВЕШНИКОВА Е. И. Нелинейные волны, связанные с процессом затвердевания	154
КУРГУЗОВ В. Д., ДЕМЕШКИН А. Г. Инициация трещины в вершине острого v -образного выреза при деформировании по II моде	155
КУРЗИН В. Б. Математическая модель и механизм возникновения акустических автоколебаний в ограниченной области при истечении или протекании через нее сжимаемой среды	156
КУЧЕР Н. А., ЖАЛНИНА А. А. О существовании глобально определенных решений уравнений механики смесей вязких сжимаемых жидкостей	157
ЛАДОВ С. В., НИКОЛЬСКАЯ Я. М., ФЕДОРОВ С. В. Расчетно-экспериментальное исследование возможности повышения скорости компактных элементов, формируемых взрывными метательными устройствами с комбинированными кумулятивными облицовками	158
ЛАРИЧКИН А. Ю., ЗАХАРЧЕНКО К. В. ГОРЕВ Б. В., КАПУСТИН В. И., МАКСИМОВСКИЙ Е. А. Влияние скорости процесса горячего формообразования на долговечность элементов конструкций из сплавов В95пчТ2 и В95очТ2 (Al-Zn-Mg-Cu)	159
ЛЕВИН В. А., ЖУРАВСКАЯ Т. А. Управление детонацией в высокоскоростном потоке газовой смеси в плоском канале с сужением	160
ЛЕГАН М. А., БЛИНОВ В. А., ЛАРИЧКИН А. Ю., НОВОСЕЛОВ А. Н. Применение метода граничных элементов для моделирования разрушения цилиндрических тел гидроразрывом	161
ЛЕГАН М. А., НОВОСЕЛОВ А. Н., ФЕДОРОВА Н. В. Образование кольцевых трещин в стекле при контактном взаимодействии	162
ЛОБАНОВ А. В. Численный анализ задачи магнитной маскировки с использованием двухслойной маскировочной оболочки	163
ЛУЦЕНКО Н. А. Тление пористых сред: численная модель и сравнение расчетов с экспериментом	164

ЛУЦЕНКО Н. А., ФЕЦОВ С. С. <i>О численной модели одномерных нестационарных течений газа через слой капсулированного плавящегося теплоаккумулирующего материала</i>	165
ЛЮБАНОВА А. Ш. <i>О новых коэффициентных обратных задачах для псевдопараболических уравнений фильтрации</i>	166
ЛЮБИМОВА О. Н., МОРКОВИН А. В. <i>Исследование кинетики протекания диффузионных процессов при формировании спая стекло-сталь</i>	167
ЛЮЛЬКО Н. А., КМИТ І. У. <i>О качественных свойствах возмущенных сверхустойчивых линейных гиперболических систем</i>	168
МАЕВСКИЙ К. К. <i>Численное исследование ударно-волнового нагружения окислов и силикатов</i>	169
МАЛИ В. И., АНИСИМОВ А. Г., ЕСИКОВ М. А., ДУДИНА Д. В. <i>Синтез и компактирование материалов методом электроискрового спекания</i>	170
МАМОНТОВ А. Е., ПРОКУДИН Д. А. <i>Глобальная разрешимость начально-краевой задачи для одномерных уравнений динамики многоскоростных смесей</i>	171
МАРКОВ В. Г., ПОПОВ С. В. <i>Краевые задачи для параболических уравнений высокого порядка с меняющимся направлением времени</i>	172
МАРКОВ П. В. <i>Применение групповых классификаций при исследовании дискретных моделей процессов фильтрации в пористых средах</i>	173
МАРЫШЕВ Б. С. <i>О параметрической неустойчивости пульсационного потока примеси при фильтрации через замкнутую область пористой среды с учетом эффектов сорбции</i>	174
МАРЫШЕВ Б. С., ГОЛДОБИН Д. С. <i>Гидродинамическая дисперсия при вытеснении жидкости в пористой среде со случайными макроскопическими неоднородностями</i>	175
МЕГРАБОВ А. Г. <i>О геометрическом анализе группы эквивалентности и законах сохранения</i>	176
МЕЛЕШКО С. В., МОШКИН Н. П., ПЕТРОВА А. Г., ПУХНАЧЕВ В. В. <i>Характеристические свойства и точные решения уравнений несжимаемой вязкоупругой среды Максвелла</i>	178
МЕСТНИКОВА А. А., СТАРОВОЙТОВ В. Н. <i>О свободной границе потока идеальной жидкости над неровным дном с точечным стоком</i>	179
МИКУШИНА В. А., СМОЛИН И. Ю, СИДОРЕНКО Ю. Н. <i>Численное исследование напряженно-деформированного состояния керамического биокompозита</i>	180
МИРЕНКОВ В. Е. <i>Масштаб ослаблений и разрушение</i>	181
МИРЕНКОВ В. Е., САВЧЕНКО А. В. <i>Обратные задачи расчета деформирования кучечно-однородных конструкций</i>	181
МИРОНОВ С. Г., ПОПЛАВСКАЯ Т. В., КИРИЛОВСКИЙ С. В., <i>Влияние нагрева пористого материала на аэродинамическое сопротивление при сверхзвуковом обтекании цилиндра с газопроницаемыми пористыми вставками</i>	182
МИРОНОВА Е. А., СТЕПАНОВА Л. В. <i>Теоретическое и численное решения задач определения напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в условиях смешанного нагружения в связанной постановке (ползучесть — поврежденность)</i>	183

МОИСЕЕВА К. М., КРАЙНОВ Д. А., ДЕМЕНТЬЕВ А. А. Устойчивость горения угле-метано-воздушной смеси в рекуперативной горелке	184
МОЧАЛОВА В. М., УТКИН А. В. Экспериментальное исследование стеклопластиков при ударно-волновом воздействии	185
НАДКРИНИЧНЫЙ Л. В. Образование волнового возмущения на поверхности мелкой воды под действием цилиндрической ударной волны в газе	186
НАЗАЙКИНСКИЙ В. Е. Асимптотика граничных значений в линейной задаче о набегах длинных волн на пологий берег	187
НАЗАРОВА Л. А., НАЗАРОВ Л. А., ВАНДАММ М., ПЕРЕЙРА Ж.-М. Обратные задачи механики сорбирующих сред: определение фильтрационных и деформационных свойств углей по экспериментальным данным	188
ОБУХОВ А. Г., БАРАННИКОВА Д. Д. Расчет термодинамических характеристик восходящего закрученного потока с пятью источниками нагрева	189
ОБУХОВ А. Г., ВОЛКОВ Р. Е. Расчет скоростных и энергетических характеристик течений газа в восходящих закрученных потоках при вертикальном продуве	190
ОКУЛОВ В. Л., ЛИТВИНОВ И. В., МИККЕЛЬСЕН Р. Ф., НАУМОВ И. В. Автомодельность следов за тандемами из неподвижных дисков и вращающихся роторов	191
ОРЛОВ С. А., МАТВЕЕВ К. А. Нормирование и испытания бортовой аппаратуры космических аппаратов на ударные воздействия	192
ОСИПЦОВ А. А. Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта	193
ОСТАПЕНКО В. В. О применимости длинноволнового приближения для построения гиперболических моделей гидродинамических течений	194
ОСТАПЕНКО В. В., ЧЕРЕВКО А. А., ГОЛОГУШ Т. С. О расчете разрывных решений скалярного закона сохранения с невыпуклым потоком	195
ОСТРОСАБЛИН Н. И. Общее решение двумерной системы статических уравнений Ламе линейной упругости с несимметричной матрицей модулей упругости	196
ПАЛЫМСКИЙ И. Б., ПАЛЫМСКИЙ В. И., ФОМИН П. А., ТРИФАНОВ А. В. Об управлении интенсивностью конвективных процессов в химически реагирующем равновесном газе	197
ПАЛЫМСКИЙ В. И., ПАЛЫМСКИЙ И. Б., ФОМИН П. А., ФРОЛОВ И. В. О подавлении конвекции в химически равновесном реагирующем газе впрыском инертных микрочастиц	198
ПАЛЬЧИКОВ Е. И., ДОЛГИХ А. В., КЛЫПИН В. В., РЯБЧУН А. М., КРАСНИКОВ И. Ю. Импульсный рентгеновский аппарат для синхронной стереосъемки и малоракурсной томографии взрывных и быстропотекающих процессов	199
ПАПИН А. А., ТОКАРЕВА М. А. Разрешимость начально-краевых задач для уравнений фильтрации вязкой жидкости в деформируемой пористой среде	200
ПАРШИН Д. В., КУЯНОВА Ю. О. Исследование механических свойств стенки церебральных аневризм: эксперимент и численное моделирование	201
ПАХНУТОВА Н. В., ЗЕЛЕПУГИН А. С., ХРИСТЕНКО Ю. Ф., ЗЕЛЕПУГИН С. А. Численное моделирование задачи Тейлора для медных образцов с использованием модели Джонсона—Кука	202
ПАХОМОВ М. А., ТЕРЕХОВ В. И. Моделирование структуры течения и теплопереноса в турбулентной импактной газожидкостной струе	203

ПЕКШЕВА А. А., СТЕПАНОВА Л. В. Аналитический метод приближенного решения краевых задач определения напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в материале с нелинейными конституциональными соотношениями	204
ПЕНЬКОВСКИЙ В. И., КОРСАКОВА Н. К. Влияние волнового воздействия на очистку прискважинной зоны нефтяного пласта	205
ПЕРЕПЕЛИЦА Б. В. Образование вихревых структур в струе под действием акустического поля.	206
ПЕТРОВ А. Г., БАЙКОВ Н. Д. О формировании кумулятивных струй в плоскопараллельном потоке идеальной жидкости	207
ПЕТРОВ А. Г., ПОТАПОВ И. И. Моделирование обтекания турбулентным потоком периодических донных волн	208
ПЕТРОВ А. Г., ЮДИН М. А. Об устойчивости цилиндра в ограниченном вихревом циркуляционном потоке с постоянной завихренностью	209
ПЕШКОВ И. М., РОМЕНСКИЙ Е. И., ДУМБСЕР М. Гиперболическая унифицированная модель механики сплошной среды	210
ПОГУДАЛИНА С. В., ФЕДОРОВА Н. Н., ФЕДОРОВ А. В. Математическое моделирование близких к резонансным режимов колебания упругого стержня	211
ПОЛИВАНОВ П. А., СИДОРЕНКО А. А. Подавление ламинарного отрыва искровым разрядом при сверхзвуковом числе Маха	212
ПОПЛАВСКАЯ Т. В., КИРИЛОВСКИЙ С. В., МИРОНОВ С. Г. Моделирование сверхзвукового обтекания тела с передней газопроницаемой вставкой с использованием дискретной модели высокопористой ячеистой среды	213
ПОПЛАВСКИЙ С. В., БОЙКО В. М., ЛОТОВ В. В., НЕСТЕРОВ А. Ю. О диспергировании жидкости в коаксиальной сверхзвуковой газовой струе	214
ПОРЯЗОВ В. А., КРАЙНОВ А. Ю. Расчет скорости горения металлизированного смесового твердого топлива при изменении давления	214
ПРОСВИРЯКОВ Е. Ю. О волнах давления в вязкой несжимаемой жидкости	215
ПРОСВИРЯКОВ Е. Ю. Точные решения уравнений Навье-Стокса с произвольной зависимостью скоростей от двух координат	216
ПРОХОРОВ Е. С. Скорость детонации в плохо перемешанных газовых смесях	217
РАДЧЕНКО П. А. Численное моделирование деформирования и разрушения перспективных материалов и конструкций с использованием вычислительного комплекса EFES	218
РАЕВСКАЯ Г. А., ЗАХАРЧЕНКО К. В., ЛАРИЧКИН А. Ю. Определение оптимальных параметров технологического процесса формообразования плит из сплавов В95 и В-1461 в режимах ползучести, применяемых в конструкции самолета "ОКБ "Сухого"	219
РАССОХА С. С., ЛАДОВ С. В., БАБКИН А. В. Анализ вращательного движения рифленых оболочек	220
РЕЗАНОВА Е. В. Численное исследование течения тонкого слоя жидкости с учетом испарения на термокапиллярной границе	221
РЕЗНИКОВ Б. С., КУЗЬМИН К. А. Учет анизотропии свойств субструктурных элементов при исследовании прочности макронеоднородных сред в случае плоского напряженного состояния	222

РЕШЕТОВА А. И., ПОПЛАВСКАЯ Т. В., КИРИЛОВСКИЙ С. В., ЦЫРЮЛЬНИКОВ И. С. <i>Воздействие звукопоглощающих покрытий на развитие возмущений в потоке смеси колебательно возбужденных газов</i>	223
РЕШМИН А. И., ЗАЙКО Ю. С., СУДАРИКОВА А. Д., ТЕПЛОВДСКИЙ С. Х. <i>Технология формирования круглых затопленных струй с увеличенной длиной начального участка</i>	224
РОТАНОВА Т. А., КОРОБЕЙНИКОВ С. Н. <i>Влияние нелинейных членов в задачах теории упругости с начальными напряжениями на основе компьютерного моделирования</i>	224
РУДОЙ Е. М., ЩЕРБАКОВ В. В. <i>Математическое и численное моделирование равновесия упругого тела, армированного тонким упругим включением</i>	225
РЫБНИКОВ А. И., СИМОНОВ Е. В., ЖДАН С. А. <i>Моделирование непрерывной детонации смеси водород-воздух в цилиндрической камере</i>	226
САМСОНОВ А. Н., САМОЙЛОВА Х. В. <i>Испытания устройства высокоскоростной видеосъемки детонационных волн</i>	227
САНДУЛЯНУ Ш. В. <i>Взаимодействие газовых пузырьков в жидкости вблизи контакта</i>	228
САРИЦКАЯ Ж. Ю., БРИЗИЦКИЙ Р. В. <i>Задачи граничного управления для нелинейной модели конвекции-диффузии-реакции</i>	229
САТОНКИНА Н. П., ЕРШОВ А. П., ЮНОШЕВ А. С., ПЛАСТИНИН А. В. <i>Прямое сопоставление распределения электропроводности и профиля массовой скорости</i>	230
СВИРИДОВ А. В., ОДИНОКОВ В. И., ДМИТРИЕВ Э. А., ЕВСТИГНЕЕВ А. И. <i>Численное моделирование напряженно деформированного состояния электрофоретических оболочковых форм</i>	231
СЕМЕНКО Е. В., СЕМЕНКО Т. И. <i>Линейная задача об ударной волне в неклассическом случае</i>	232
СЕНАШОВ С. И., ГОМОНОВА О. В. <i>Построение упругопластической границы в задаче о растяжении пластинки, ослабленной отверстиями</i>	233
СЕНАШОВ С. И., КОНДРИН А. В., САВОСТЬЯНОВА И. Л. <i>Решение краевых задач пластичности с помощью законов сохранения</i>	234
СЕННИЦКИЙ В. Л. <i>Об управлении подъемной силой, действующей на твердое тело в вязкой жидкости</i>	235
СИБИН А. Н. <i>Численное исследование математической модели внутренней эрозии грунта</i>	236
СМЕЛИКОВ В. Г. <i>Генерация упруго-пластических волн в кумулятивных струях и пробитых преградах</i>	236
СМОЛИН А. Ю., СМОЛИН И. Ю., ЕРЕМИНА Г. М., СМОЛИНА И. Ю. <i>Многоуровневое моделирование пористой керамики методом подвижных клеточных автоматов</i>	238
СОБАЧКИНА Н. Л. <i>О движении бинарной смеси с цилиндрической свободной поверхностью при малых числах Марангони</i>	239
СПИВАК Ю. Э. <i>Оптимизационный подход к решению задач маскировки относительно статических полей</i>	240

СТАНКЕВИЧ С. В., ШВЕЦОВ Г. А., БУТОВ В. Г., СИНЯЕВ С. В. <i>Тепловые ограничения в высокотемповом многогорельсовом ускорителе твердых тел с питанием от импульсного МГД-генератора</i>	241
СТАРОВОЙТОВ В. Н., СТАРОВОЙТОВА Б. Н. <i>Моделирование хаотичной динамики полимерной молекулы в жидком растворе с приложением к разработке наносенсора</i>	242
СТАРОВОЙТОВА Б. Н., СТАРОВОЙТОВ В. Н. <i>Акустические свойства насыщенной жидкостью Максвелла слоистой пористой среды</i>	242
СТЕПАНОВА И. В. <i>О симметриях и точных решениях уравнений теплообмена</i>	243
СТЕПАНОВА Л. В. <i>Многопараметрический анализ поля напряжений у вершины трещины: оценка влияния высших приближений в полном асимптотическом разложении М. Уильямса</i>	244
СТОЯНОВСКИЙ О. И., ЗЛОБИН Б. С., ШТЕРЦЕР А. А., МЕЩЕРЯКОВ Ю. П. <i>Металлические взрывные камеры: проектирование, изготовление, применение</i>	245
СТУРОВА И. В., ТКАЧЕВА Л. А. <i>Волновые явления в жидкости под неоднородным ледяным покровом</i>	246
СУХИНИН С. В. <i>Образование сильных разрывов гидроупругих волн в неоднородных каналах</i>	247
ТАКМАЗЬЯН А. К., ПРОКОФЬЕВ В. В., ФИЛАТОВ Е. В., ЯКИМОВ А. Ю. <i>Экспериментальные и численные исследования эффективности волновых движителей различных типов</i>	248
ТАЛЫШЕВ А. А. <i>Дифференциально-инвариантные решения и нормализатор</i>	249
ТЕРЕШКО Д. А. <i>Численное решение обратных задач гидродинамики</i>	250
ТРИЛИС А. В. <i>Скорость роста по времени неустойчивых волн возмущения цилиндрического фронта горения</i>	251
ТРОФИМОВ В. С., АЛЫМОВ М. И., ПЕТРОВ Е. В. <i>Объяснение мартенситного превращения с позиции детонационного процесса</i>	252
ТРОФИМОВ В. С., ВЕРЕТЕННИКОВ В. А. <i>Расчет параметров детонации конденсированных ВВ</i>	252
ТРОЦЮК А. В., ФОМИН П. А. <i>Численное исследование классических и вращающихся детонационных волн в метановых смесях</i>	254
ТУРКОВА В. А. <i>Асимптотическое поведение упругопластической пластины с вырезом под действием циклического нагружения</i>	255
УСОЛЬЦЕВА О. М., ВОСТРИКОВ В. И., ЦОЙ П. А., СЕМЕНОВ В. Н. <i>Пространственно-временная взаимосвязь полей деформаций, микродеформаций и параметров сигналов микросейсмической эмиссии в геомоделях с полостью под воздействием внешних напряжений</i>	256
УТКИН А. В., МОЧАЛОВА В. М. <i>Неклассические режимы детонации жидких взрывчатых веществ</i>	257
ФАНКИНА И. В. <i>Контактная задача для упругой пластины, содержащей тонкое жесткое включение</i>	258
ФЕДОРОВ А. В., ТРОПИН Д. А. <i>Математическое описание воспламенения, горения и распространения детонации в реагирующих газовых смесях в присутствии микро- и наночастиц</i>	259

ФЕДОРОВ А. В., ХМЕЛЬ Т. А., ЛАВРУК С. А. Моделирование распространения детонации в бидисперсной смеси в расширяющемся канале	260
ФЕДОРОВ В. Е. Оценка погрешности нестационарного метода Галеркина для уравнения смешанного типа высокого порядка	260
ФИЛАТОВ Е. В., ЯКИМОВ А. Ю. Волнообразование перед глассирующей пластинкой	261
ФОМИН П. А., ТРОЦЮК А. В., ВАСИЛЬЕВ А. А. Приведенная детонационная кинетика и структура детонационной волны в одно- и многокомпонентных топливных смесях	262
ХАРЬКОВ Н. С. Математическая модель турбулентных неизотермических увлажненных вентиляционных струй	262
ХЕГАЙ Е. И. Заполнение прямоугольной емкости вязкой жидкостью методом свободного литья	263
ХЛУДНЕВ А. М. Идентификация параметров тонких включений в упругих телах .	264
ХМЕЛЬ Т. А. Ячеистая детонация в газозвесах наноразмерных частиц алюминия	264
ХОТЯНОВСКИЙ Д. В., КУДРЯВЦЕВ А. Н. Численное исследование влияния распределенной шероховатости поверхности на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое	265
ЦОЙ П. А., ХОМЕНКО И. П. Исследование деформационно-прочностных свойств песчаника в условиях многоступенчатого объемного сжатия	266
ЦЫРЮЛЬНИКОВ И. С., КИРИЛОВСКИЙ С. В., ПОПЛАВСКАЯ Т. В. Взаимодействие длинноволновых возмущений с ударной волной на клине и метод модовой декомпозиции пульсаций сверхзвукового потока	267
ЧАНЫШЕВ А. И. О кругах Мора	268
ЧАНЫШЕВ А. И., БЕЛОУСОВА О. Е., АБДУЛИН И. М. Задачи Коши в статике и динамике для уравнений теорий упругости, пластичности и запредельного деформирования	269
ЧИРКУНОВ Ю. А. Движение газа в сильно разреженном пространстве	270
ЧИРКУНОВ Ю. А., БЕЛЬМЕЦЕВ Н. Ф. Статическая деформация трансверсально-изотропной упругой среды	271
ЧИЧИНДАЕВ Г. А. Численное моделирование характеристик воздушного винта . . .	272
ЧУМАКОВ Ю. А., КНЯЗЕВА А. Г. Двухуровневая модель синтеза композита $TiC-NiAl$ в условиях механоассистированного нагрева	272
ЧУПАХИН А. П., ЯНЧЕНКО А. А. О релятивистском вихре Овсянникова	273
ШАВЕЛКИНА М. Б., АМИРОВ Р. Х., ИВАНОВ П. П., ФИЛИМОНОВА Е. А. Синтез углеродных наноструктур при конверсии углеводов в плазменной струе . .	274
ШАПЕЕВ А. В., ПОДРЯБИНКИН Е. В., ГУБАЕВ К. В. Машинное обучение в молекулярном моделировании	275
ШАРЫПОВ О. В., КРАСИНСКИЙ Д. В. Самоподдерживающийся фронт испарения в метастабильной жидкости	276
ШЕВЦОВА Л. И., МАЛИ В. И., АНИСИМОВ А. Г., ОГНЕВА Т. С., НЕМОЛОЧНОВ Д. А. Влияние легирующих элементов на механические свойства интерметаллида Ni_3Al , полученного методом искрового плазменного спекания	277
ШЕЛУХИН В. В. Двухфазные гранулированные жидкости	278
ШИШМАРЕВ К. А., ХАБАХПАШЕВА Т. И., КОРОБКИН А. А. Движение подводного тела подо льдом в канале	279

ШМИДТ А. В. <i>Инвариантные решения $k - \omega$ модели дальнего турбулентного следа</i>	280
ШТЕРЦЕР А. А., УЛЬЯНИЦКИЙ В. Ю., БАТРАЕВ И. С., РЫБИН Д. К. <i>Импульсный газодетонационный аппарат как генератор наноглобулярного углерода (графена)</i>	281
ШУТОВ А. В., ЛАРИЧКИН А. Ю., ШУТОВ В. А. <i>Идентификация параметров модели анизотропной ползучести в геометрически точной постановке</i>	282
ЩЕРБАКОВ В. В. <i>Производная интеграла энергии по форме области в нелинейной задаче о равновесии упругой пластины с тонкими дефектами</i>	283
ЭГЛИТ М. Э., ЯКУБЕНКО А. Е., ЯКУБЕНКО Т. А. <i>Численное исследование влияния захвата донного материала и неньютоновской реологии на динамику турбулентных склоновых потоков</i>	284
ЯКОВЕНКО С. Н. <i>Карта сценариев развития неустойчивости в области обрушения подветренных волн</i>	285
ЯНЧЕНКО А. А., РОМЕНСКИЙ Е. И., ХЕ А. К., ЧУПАХИН А. П. <i>Моделирование течения жидкости сквозь упругий пористый скелет в приложении к задачам гемодинамики на основе термодинамически согласованных систем законов сохранения</i>	286
ЯНЬКОВА Г. С., ЧЕРЕВКО А. А., АКУЛОВ А. Е., ПАРШИН Д. В. <i>Влияние сахарного диабета I типа на архитектуру кровеносных сосудов головного мозга малых лабораторных животных</i>	287
ANTONTSEV S. N., SHMAREV S. I. <i>The energy method. Application to PDEs with non-standard growth</i>	288
FAVRIE N., GAVRILYUK S., MASSONI J., TKACHENKO S. <i>Hyperbolic models of bubbly fluids: variational approach</i>	289
GREBENEV V. N., WASŁAWCZYK M., OBERLACK M. <i>On the conformal invariance of a probability measure of vorticity in 2D turbulence</i>	290
GRIGORIEV YU. N., KARNBANJONG A., MELESHKO S. V., SURIYAWICHITSERANEE A. <i>Group classification of the Boltzmann equation with a source function</i>	291
KOROVKOV M. V. <i>On apriory estimates for solutions to the steady Navier-Stokes system</i>	291
Авторский указатель	292

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ИСТЕЧЕНИЯ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ СТРУЙ В ПОЛУОТКРЫТОМ КАНАЛЕ

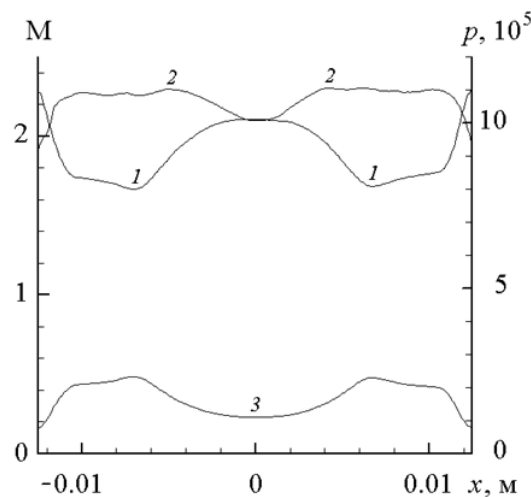
В. М. Абашев¹, И. В. Еремкин¹, Н. П. Животов¹, В. П. Замураев^{2,3},
А. П. Калинина^{2,3}, П. К. Третьяков², А. В. Тупикин²

¹Московский авиационный институт

²Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск

³Новосибирский государственный университет

Щелевые сопла представляют практический интерес как альтернатива применению сопел Лавала [1]. В данной работе представлены результаты экспериментального и численного исследования газодинамики течения при пересечении сверхзвуковых нерасчетных струй в толстостенных полуоткрытых каналах. Для осесимметричных каналов с полусферическим дном и отношением суммарной площади отверстий для струй к площади выходного сечения канала 0.25 были проведены эксперименты и расчеты при давлении в форкамере до 2.5 МПа. Результаты получены для встречных и сфокусированных струй. При достижении некоторого критического давления течение становится сверхзвуковым с постоянным числом Маха. По экспериментальным данным рассчитан коэффициент восстановления полного давления. Он в два раза больше для сфокусированных струй, чем для встречных. На рисунке для сфокусированных струй при давлении в форкамере 2.4 МПа показано расчетное распределение числа Маха (1), полного давления (2) и статического давления (3) по диаметру выходного сечения канала.



Анализ данных свидетельствует о реализации в канале течения в режиме сверхзвукового газодинамического сопла. Потери давления в значительной степени зависят от процесса смешения струй, что определяется отношением площадей отверстий к выходной площади канала, а также расположением и направлением отверстий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abashev V. M., Eremkin I. N., Zhivotov N. P., Zamuraev V. P., Kalinina A. P., Tretyakov P. K., Tupikin A. V. *Experimental and numerical investigation of the flow in half-closed channel with intersecting jets*. AIP Conf. 2016. 1770, 030078; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4964020>

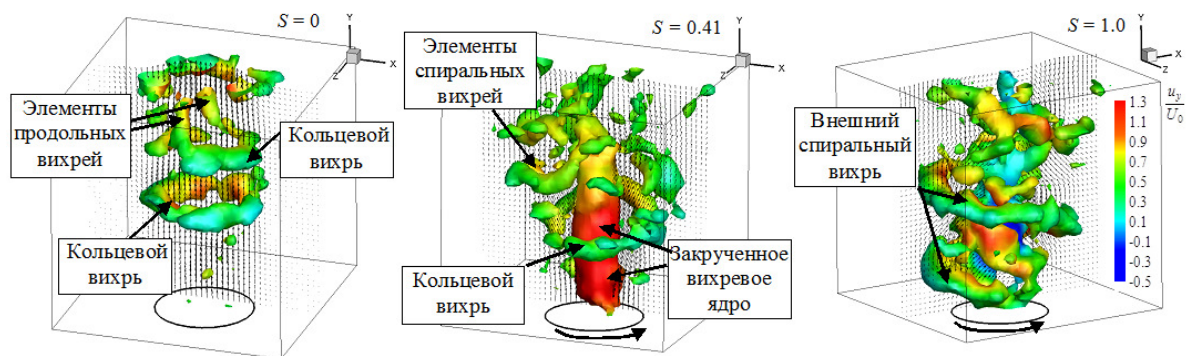
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА 3D ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ В СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ С ЗАКРУТКОЙ

С. С. Абдуракипов, М. Ю. Хребтов, В. М. Дулин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Целью работы являлось экспериментальное исследование структуры и динамики крупных вихрей на начальном участке турбулентных струйных течений с закруткой потока с применением томографического метода Particle Image Velocimetry и методов пространственно-временной декомпозиции полей скорости и давления: Proper Orthogonal Decomposition и Dynamic Mode Decomposition.

Для организации струйных течений в гидродинамической камере было использовано сопло Витошинского с выходным диаметром $d = 15$ мм. Число закрутки потока определялось по геометрии завихрителя и равнялось $S = 0, 0.41$ и 1.0 . Число Рейнольдса и среднерасходная скорость потока равнялись $Re = 8900$, $U_0 = 0.5$ м/с, соответственно. Для измерения с частотой 2 кГц 3D полей мгновенной скорости была использована скоростная томографическая PIV система [1]. На рисунке показаны примеры распределений полей мгновенной скорости и критерия Q идентификации вихревых структур, раскрашенного в соответствии со значением осевой компоненты скорости. В работе на основе комплекса современных методов экспериментальной гидромеханики получена и систематизирована новая информация о характеристиках спиральных вихревых структур, связанных с доминирующими модами гидродинамической неустойчивости потока, проанализирована роль спиральных вихревых образований в структуре и динамике турбулентной струи при различной интенсивности закрутки.



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-31-00471).

ЛИТЕРАТУРА

1. Markovich D. M., Dulin V. M., Abdurakipov S. S. et al. *Helical modes in low-and high-swirl jets measured by tomographic PIV*. Journal of Turbulence. 2016. V. 17. N. 7. Pp. 678–698.

ОБ ОДНОМ КЛАССЕ МАССОВЫХ СИЛ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАЗРЕШИМОСТЬ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА

М. М. Абенов

Институт механики и машиноведения КН МОН РК, Алматы, Казахстан

В некоторой области $G \subset R^3 \times [0, \infty)$ рассмотрим систему уравнений Навье–Стокса

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \nu \Delta \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{F}(t, x, y, z) \quad (1)$$

с условием неразрывности:

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0. \quad (2)$$

Общеизвестно, что при потенциальной массовой силе $\vec{F} = \nabla Q$, система (1)–(2) имеет решение (потенциал скоростей). Здесь мы дадим описание более широкого класса массовых сил, обеспечивающих разрешимость системы Навье–Стокса, что согласуется с выводами работы [1]. Пусть: $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ – 10 разрешающих параметров системы. Это – действительные или комплексные скаляры (в общем случае они являются безразмерными скалярными функциями от числа Рейнольдса), связанные следующими соотношениями $\alpha^2 - \beta^2 - \gamma^2 \neq 0$, $\lambda = -\frac{\alpha\alpha_0 - \beta\beta_0 - \gamma\gamma_0}{\alpha^2 - \beta^2 - \gamma^2}$, $\alpha_1 = \alpha_0 + \lambda\alpha$; $\beta_1 = \beta_0 + \lambda\beta$; $\gamma_1 = \gamma_0 + \lambda\gamma$.

Далее, пусть $u = (u_0(t, x, y, z), u_1, u_2, u_3) \in M_A(G)$ – четырехмерная регулярная функция (бесконечномерное пространство таких функции описано в [2]), $\Phi(t, x, y, z) \in C^\infty(G)$ – произвольная ограниченная функция. Введем безразмерные независимые переменные: $\frac{\delta ct}{L} = t_1$, $\frac{\alpha x}{L} = x_1$, $\frac{\beta y}{L} = y_1$, $\frac{\gamma z}{L} = z_1$, где c, L – положительные постоянные, имеющие размерности скорости и длины. Теперь определим класс массовых сил так:

$$F_1(t, x, y, z) = \frac{\alpha_0 c^2}{L} \frac{\partial \psi(t_1, x_1, y_1, z_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial \Phi(t, x, y, z)}{\partial x}, \quad (3)$$

$$F_2(t, x, y, z) = \frac{\beta_0 c^2}{L} \frac{\partial \psi(t_1, x_1, y_1, z_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial \Phi(t, x, y, z)}{\partial y}, \quad (4)$$

$$F_3(t, x, y, z) = \frac{\gamma_0 c^2}{L} \frac{\partial \psi(t_1, x_1, y_1, z_1)}{\partial z_1} + \frac{\partial \Phi(t, x, y, z)}{\partial z}. \quad (5)$$

Здесь:

$$\psi(t_1, x_1, y_1, z_1) = \delta u_0(t_1, x_1, y_1, z_1) + \frac{\alpha_1 \alpha}{2} u_1^2 + \frac{\beta_1 \beta}{2} u_2^2 + \frac{\gamma_1 \gamma}{2} u_3^2 - \frac{\nu(\alpha^2 - \beta^2 - \gamma^2)}{cL} \frac{\partial u_1}{\partial x_1}. \quad (6)$$

Теорема. Для любого вектора массовых сил из класса (3)–(5), система (1)–(2) имеет точное (ограниченное) решение: $(V_1, V_2, V_3, P) \in C^\infty(G)$ следующего вида:

$$V_1(t, x, y, z) = c\alpha_1 u_1 \left(\frac{\delta ct}{L}, \frac{\alpha x}{L}, \frac{\beta y}{L}, \frac{\gamma z}{L} \right), \quad (7)$$

$$V_2(t, x, y, z) = -c\beta_1 u_2 \left(\frac{\delta ct}{L}, \frac{\alpha x}{L}, \frac{\beta y}{L}, \frac{\gamma z}{L} \right), \quad (8)$$

$$V_3(t, x, y, z) = -c\gamma_1 u_3 \left(\frac{\delta ct}{L}, \frac{\alpha x}{L}, \frac{\beta y}{L}, \frac{\gamma z}{L} \right), \quad (9)$$

$$P(t, x, y, z) = \rho\Phi - \lambda\rho c^2\psi + C(t). \quad (10)$$

При фиксированном наборе разрешающих параметров, формулы (7)–(10) дают континуум точных решений (1)–(2). Можно показать, что в них содержатся известные точные решения (Пуазейля, Куэтта и др) системы Навье–Стокса, которые можно получить при конкретных значениях разрешающих параметров и вида регулярной функции $u = (u_0(t, x, y, z), u_1, u_2, u_3) \in M_A(G)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пухначев В. В. *Симметрии в уравнениях Навье–Стокса*. Успехи механики №1, 2006.
2. Абенюв М. М. *Решения системы уравнений Навье–Стокса*. Алматы.: Изд-во К-2, 2013.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЙ И НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛЕЙ

В. В. Адищев, М. С. Грачева, И. В. Кучеренко

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Механические свойства структурно-неоднородных материалов зависят от большого числа различных факторов: характеристик компонент, их удельного объемного содержания, взаимного расположения и качества адгезионных связей. При расчете конструкций из таких материалов даже с применением мощных программных комплексов невозможно учитывать в полной мере взаимодействие структурных компонент, поэтому возникает необходимость разработки математических моделей структурно-неоднородных материалов и определения их жесткостных характеристик.

В [1] была предложена математическая модель, в которой на основе структурного подхода и корректно сформулированных условий сопряжения на границах раздела элементов композиции были учтены произвольный характер анизотропии любого числа компонент, их объемное содержание и взаимное расположение в случае сложного напряженного состояния. В детерминированной постановке эта модель была применена для моделирования напряженно-деформированного состояния кирпичных кладок и материала типа бетона, получено соответствие имеющимся в литературе экспериментальным данным.

Важной особенностью структурно-неоднородных материалов является высокая степень неопределенности механических свойств их составляющих. Поэтому данную задачу следует отнести к неформализованным (по Ньюэллу [2]) задачам с “плохими”, в частности, не поддающимися статистической обработке, исходными данными. На основе разработанных детерминистических моделей строятся модели, в которых исходные данные описываются как нечеткие величины. Все расчетные параметры определяются функциями принадлежности,

дающими необходимые оценки типа интервальных, путем выявления значимых носителей функций принадлежности.

С применением алгебры нечетких чисел [3] получены жесткостные характеристики структурно-неоднородного материала в нечеткой постановке с учетом наихудших и наилучших сочетаний исходных данных, закладываемых в расчет.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00975 А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Резников Б. С., Никитенко А. Ф., Кучеренко И. В. *Прогнозирование макроскопических свойств структурно-неоднородных сред. Сообщение 1.* Изв. вузов. Строительство. 2008. № 2. С. 10–17.
2. Ньюэлл А., Саймон Х. *Информатика как эмпирическое исследование: символы и поиск.* В сб. “Лекции лауреатов премии Тьюринга”, М.: Мир, 1993. 334 с.
3. Адищев В. В., Шмаков Д. С. *Определение момента образования трещины как нечеткой величины по экспериментальным данным.* // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 5. С. 62–73.

СИММЕТРИИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ СРЕДЫ

А. В. Аксенов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Фундаментальные решения линейных уравнений математической физики зачастую являются инвариантными относительно преобразований, допускаемых исходным уравнением [1]. Для построения фундаментального решения в настоящей работе используется алгоритм нахождения фундаментальных решений, предложенный автором в работе [2].

Введенные в работе [3] два канонических линейных уравнения, заменой переменных можно свести к уравнению вида

$$Lu \equiv u_{xxxx} + 2u_{xxyy} + u_{yyyy} + b(u_{xxzz} + u_{yyzz}) + u_{zzzz} = 0, \quad b \geq 2. \quad (1)$$

Фундаментальные решение уравнения (1) удовлетворяют уравнению

$$Lu = \delta(x)\delta(y)\delta(z). \quad (2)$$

Можно найти алгебру Ли операторов симметрии уравнения (1). Тогда, используя основной результат работы [2], получаем следующее предложение.

Предложение 1. Уравнение (2) при произвольном параметре b допускает следующий базис алгебры Ли операторов симметрии

$$Y_1 = y \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial y}, \quad Y_2 = x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} + z \frac{\partial}{\partial z} + u \frac{\partial}{\partial u}. \quad (3)$$

Сформулируем основной результат работы.

Теорема 1. *Фундаментальное решение уравнения (1), инвариантное относительно операторов симметрии (3), можно записать в виде*

$$u_{\phi} = \frac{a}{4\pi(a^2 - 1)} \left[\sqrt{\frac{r^2}{a} + z^2} - \sqrt{ar^2 + z^2} + \right. \\ \left. + \frac{z}{2} \ln \frac{\left(\sqrt{\frac{r^2}{a} + z^2} - z\right)\left(\sqrt{ar^2 + z^2} + z\right)}{\left(\sqrt{\frac{r^2}{a} + z^2} + z\right)\left(\sqrt{ar^2 + z^2} - z\right)} \right],$$

где параметр a удовлетворяет соотношению $b = a + 1/a$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00361 и 15-01-04677).

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянников Л. В. *Групповой анализ дифференциальных уравнений*. М.: Наука, 1978.
2. Аксенов А. В. *Симметрии линейных уравнений с частными производными и фундаментальные решения*. ДАН. 1995. Т. 342. № 2. С. 151–153.
3. Георгиевский Д. В. *Обобщенное представление Галеркина для трансверсально изотропной линейно-упругой среды*. ПММ. 2015. Т. 79. № 6. С. 883–887.

МОДЕЛЬ ВОЛНОВОГО РИВУЛЕТНОГО ТЕЧЕНИЯ

С. П. Актершев¹, С. В. Алексеенко^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

Такой тип пленочного течения, когда жидкость стекает в виде множество струек принято называть ривулетным (ручейковым) течением, а отдельную струйку, ограниченную двумя контактными линиями – ривулетом. Особое внимание к ривулетному течению обусловлено его прикладным значением, поскольку такое течение реализуется в различных аппаратах энергетики и химической технологии – в абсорберах, ректификационных колоннах, испарителях, теплообменниках для ожижения природного газа. Большинство теоретических исследований, начиная с пионерской работы [1], посвящены стационарным и гладким (без волн) ривулетам, стекающим по наклонной стенке. В литературе практически отсутствует как теоретическое, так и экспериментальное описание волновых режимов ривулетного течения. В [2] на основе подхода Капицы-Шкадова выполнено численное моделирование трехмерных волн в вертикальном ривулете. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [3] показало хорошее согласование по форме и амплитуде нелинейных волн.

В настоящей работе предложена теоретическая модель для описания волнового режима ривулетного течения. Используя метод взвешенной невязки, выведены уравнения, которые получаются проецированием уравнений ИВЛ модели Шкадова на специальным образом построенную систему базисных ортогональных функций. Выведенные уравнения, в отличие

от уравнений пленочного течения, содержат дополнительный параметр (безразмерную полуширину ривулета), от которого зависят дисперсионные свойства. Проведен линейный анализ устойчивости и впервые получены дисперсионные соотношения для квазиплоских волн в ривулете при умеренных значениях числа Рейнольдса $Re_m \sim 10$. Получен критерий устойчивости ривулетного течения и проведен анализ дисперсионных зависимостей в зависимости от безразмерных параметров. На основе данной модели исследована динамика нелинейных волн в вертикальном ривулете.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-29-00093).

ЛИТЕРАТУРА

1. Towell G. D., Rothfeld L. B. *Hydrodynamics of rivulet flow*. AIChE J. 1966. V. 12. PP. 972–980.
2. Alekseenko S. V., Aktershev S. P., Bobylev A. V., Kharlamov S. M., Markovich D. M. *Nonlinear forced waves in a vertical rivulet flow*. J. Fluid Mech. 2015. V. 770, Pp. 350–373.
3. Алексеенко С. В., Бобылев А. В., Гузанов В. В., Маркович Д. М., Харламов С. М. *Регулярные волны на вертикально стекающих ривулетах при разных углах смачивания*. ТИА. 2010. Т. 17, № 3. С. 371–384.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ НА ТРАНСЛЯЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАПЛИ

А. А. Алабужев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Исследуются вынужденные колебания капли жидкости, окруженной другой жидкостью в цилиндрическом сосуде конечного объема. В равновесном состоянии капля имеет форму цилиндра, который ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. На сосуд действует вибрационная сила, направленная перпендикулярно оси симметрии капли. Учитывается динамика линии контакта трех сред [1]: скорость движения контактной линии пропорциональна отклонению краевого угла от его равновесного значения. Несмотря на использование модели невязкой жидкости, применение данного условия приводит к затуханию колебаний, которое объясняется взаимодействием линии контакта с твердой поверхностью. Это эффективное граничное условие и его модификации использовались во множестве работ [2–4], например, при исследовании колебаний капиллярного моста, полусферической капли и газового пузырька на подложке, цилиндрической капли и газового пузырька, сжатой капли, рассеиванию капиллярных волн и движения линии контакта по вертикальной твердой поверхности. Главное отличие данной задачи от остальных работ – неоднородная смачиваемость подложек, т.е. постоянная Хокинга (параметр смачивания) является не постоянной величиной, а зависит от координат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-41-590108).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hocking L. M. *The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary*. J. Fluid Mech. 1987. V. 179. Pp. 253–266.
2. Ting C.-L., Perlin M. *Boundary conditions in the vicinity of the contact line at a vertically oscillating upright plate: an experimental investigation*. J. Fluid Mech. 1995. V. 295. Pp. 263–300.
3. Shklyaeв S., Straube A. V. *Linear oscillations of a hemispherical bubble on a solid substrate*. Phys. Fluids. 2008. V. 20. 052102.
4. Алабужев А. А. *Трансляционные колебания цилиндрической капли в ограниченном объеме жидкости*. Вычисл. мех. сплош. сред. 2016. Т. 9, № 4. С. 453–465.

ДИНАМИКА ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ КАПЛИ МАЛОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А. А. Алабужев^{1,2}, М. А. Кашина²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет

Изучается поведение полусферической капли на подложке под действием переменного электрического поля. Скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональны удвоенной частоте электрического поля [1]:

$$\zeta_t = \pm \lambda (\zeta_z + Af(\alpha) \cos(2\omega t)),$$

где ζ — функция отклонения поверхности, λ — параметр Хокинга, характеризующий взаимодействие линии контакта с подложкой, $f(\alpha)$ — функция, описывающая пространственную неоднородность электрического поля, ω — частота электрического поля. Данное выражение получено на основе обобщения условия Хокинга [2] и условия Юнга-Липмана [3].

Показано, что диссипация на контактной линии приводит к ограничению максимальной амплитуды колебаний в резонансе, а также к сдвигу резонансной частоты. Для колебаний поверхности на полюсе «антирезонансные» частоты отсутствуют. Увеличение параметра Хокинга приводит к росту амплитуды колебаний, т.к. слабеет взаимодействие линии контакта с подложкой.

Учтена малая вязкость (тонкий вязкий пограничный слой на твердой подложке) для случая малых значений параметра Хокинга. Показано, что вблизи резонансных частот даже слабая диссипация позволяет ограничить амплитуду колебаний. С увеличением напряжения функция значения краевого угла выходит на насыщение, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-41-590108).

ЛИТЕРАТУРА

1. Alabuzhev A. A., Kashina M. A. *The oscillations of cylindrical drop under the influence of a nonuniform alternating electric field*. J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 681. 012042.

- Hocking L. M. *The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary*. J. Fluid Mech. 1987. V. 179. Pp. 253–266.
- Mugele F., Baret J.-C. *Electrowetting: from basics to applications*. J. Phys.: Condens. Matter. 2005. V. 17. Pp. 705–774.

ПРОБЛЕМА НЕВИДИМОСТИ В АКУСТИКЕ, ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМЕ И ТЕПЛОПЕРЕНОСЕ

Г. В. Алексеев

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

В течение последнего десятилетия наблюдается возрастающий интерес к развитию эффективных методов и стратегий, обеспечивающих невидимость объектов для волн и полей различной природы (электромагнитных, акустических, магнитных, тепловых и др.). Кроме сложнейших математических и физических аспектов создания основ теории такой интерес мотивируется чрезвычайно важными технологическими приложениями к широкому множеству проблем — от маскировки объектов специального назначения до неинвазивной медицинской диагностики.

Начиная с пионерской работы [1], большое количество работ посвящено развитию разных методов маскировки материальных тел. Наиболее популярным из них является предложенный в [1] метод оптических преобразований, который был успешно применен для решения задач маскировки объектов от обнаружения средствами электромагнитной локации. Затем основные результаты из теории электромагнитной маскировки были перенесены сначала на случай акустической маскировки, а далее на случай маскировки от тепловых, магнитных и других статических полей [2–4].

Подчеркнем, что полученные с помощью метода оптических преобразований решения обладают рядом недостатков. Основным из них является сложность технической реализации полученных решений. Один из способов преодоления указанных недостатков состоит в том, чтобы применить для решения задач маскировки оптимизационный метод решения обратных задач. На основе использования этого метода в теории невидимости возникло новое направление, получившее название “метод обратного дизайна” [5]. В настоящей работе приводятся результаты, полученные автором и его учениками при применении метода обратного дизайна для решения задач маскировки относительно акустических и статических полей. Обсуждаются теоретические и вычислительные аспекты метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-01-00365-а) и программы фундаментальных исследований ДВО РАН “Дальний Восток” (проект 15-1-4-036).

ЛИТЕРАТУРА

- Pendry J. B., Shurig D., Smith D. R. *Controlling electromagnetic fields*. Science. 2006. V. 312. № 1. Pp. 1780–1782.
- Cummer S. A., Schurig D. *One path to acoustic cloaking*. New J. Phys. 2007. V. 9. Pp. 45.
- Sanchez A., Navau C., Prat-Camps J., Chen D. X. *Antimagnets: controlling magnetic fields with superconductormetamaterial hybrids*. New J. Phys. 2011. V. 13. № 093034.

4. Guenneau S., Amra C., Veynante D. *Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux*. Opt. Express. 2012. V. 20. Pp. 8207–8218 .
5. Алексеев Г. В. *Проблема невидимости в акустике, оптике и теплопереносе*. Владивосток: Дальнаука, 2016.

ТОЧНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ ТЕЧЕНИЕМ ВЯЗКОГО ГАЗА

Е. В. Амосова

*Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

Управляемость системой Навье–Стокса для сжимаемой среды рассмотрена только в одномерном случае. Так, в работе [1] доказана точная локальная управляемость с границы области. Случай системы Навье–Стокса, которая управляется с помощью управления сосредоточенного в некоторой фиксированной подобласти, изучен в работе [2].

В настоящей работе рассматривается задача управляемости двумерных уравнений Навье–Стокса для сжимаемой среды.

Пусть $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ — ограниченная область с границей $\partial\Omega \in C^\infty$, $T > 0$, $Q = (0, T) \times \Omega$, $\Sigma = (0, T) \times \partial\Omega$ — боковая поверхность цилиндра Q . Рассмотрим краевую задачу для уравнений Навье–Стокса:

$$\partial_t u(t, x) - \Delta u + (u \cdot \nabla)u + \nabla p = f(t, x) + g(t, x), \quad (1)$$

$$\partial_t \rho(t, x) + \operatorname{div} (u\rho) = 0, \quad p = a^2 \rho^\gamma, \quad \gamma = \operatorname{const} \geq 1, \quad a > 0, \quad (2)$$

где u — векторное поле скорости движения газа, ∇p — градиент давления в газе, f — заданная плотность внешних сил, g — управление, сосредоточенное в подобласти $\omega \subset \Omega$. Ставятся начальные и краевые условия:

$$u(t, x)|_{t=0} = u_0(x), \quad \rho(t, x) = \rho_0(x), \quad x \in \Omega; \quad (\operatorname{rot} u)|_\Sigma = 0, \quad (u \cdot n)|_\Sigma = 0. \quad (3)$$

Поставим задачу точной локальной управляемости. Пусть задано решение $(\hat{u}, \hat{\rho}) \in W^{1,2(1)}(Q) \times W^{1,2}(Q)$ системы (1),(2) при $g = 0$ и начальные условия $(u_0, \rho_0) \in H^2(\Omega) \times H^1(\Omega)$ такие, что

$$\hat{\rho}(0, x) = \rho_0(x), \quad x \in \Omega; \quad \|\hat{u}(0, \cdot) - u_0\|_{H^2(\Omega)}^2 \leq \varepsilon, \quad (4)$$

Требуется найти управление $g \in L^2(0, T; H^1(\omega))$, такое что решение краевой задачи (1)-(4) при $t = T$ удовлетворяло бы соотношениям

$$u(t, x)|_{t=T} = \hat{u}(T, x), \quad \rho(t, x)|_{t=T} = \hat{\rho}(T, x), \quad x \in \Omega. \quad (5)$$

Теорема. Пусть функции $(\hat{u}, \hat{\rho}) \in W^{1,2(1)}(Q) \times W^{1,2}(Q)$ такие, что $\hat{\rho} \in L^\infty(0, T; W_\infty^1(\Omega))$, $\hat{u} \in L^\infty(0, T; W_\infty^2(\Omega))$, удовлетворяют уравнениям (1),(2) при $g = 0$, (3), (4). Тогда существует управление $g \in L^2(0, T; H^1(\Omega))$, $\operatorname{supp} g \subset (0, T) \times \omega$, такое, что решение (u, ρ) задачи (1)-(4) существует в пространстве $W^{1,2}(Q) \times W^{1,1}(Q)$ и удовлетворяет равенству (5).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-11-00079).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ervedoza S., Glass O., Guerrero S., Puel J.-P. *Local exact controllability for the one-dimensional compressible Navier-Stokes equation*. Arch. Ration. Mech. Anal. 2012, V. 206. PP. 189–238.
2. Amosova E. V. *Exact Local Controllability for the Equations of Viscous Gas Dynamics*. Differential Equations 2011. V. 47. № 12. Pp. 1776–1795.

СЛОИСТОЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЕ ДВИЖЕНИЕ
ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

В. К. Андреев, Е. Н. Черемных

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Изучено слоистое однонаправленное термогравитационное движение двух вязких несжимаемых жидкостей в плоском канале. Жидкости ограничены твердыми неподвижными стенками, на которых заданы нестационарные градиенты температур, и контактируют по плоской поверхности раздела. Движение вызвано совместным действием термогравитационных и термокапиллярных сил и заданного нестационарного расхода в одном из слоев. Соответствующая начально-краевая задача является сопряженной и обратной, поскольку градиент давления вдоль канала должен находиться вместе с полем скоростей и температур. Для нее найдено точное стационарное решение и получены априорные оценки нестационарного решения. В изображениях по Лапласу решение нестационарной задачи находится в виде квадратур. Доказано, что если температура на стенках и расход стабилизируются со временем, то движение выходит на стационарный режим с ростом времени. Проведенные численные расчеты для конкретных жидких сред хорошо соотносятся с теоретическими результатами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-01-00229).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ЭТАПА
МЕТАНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК И ПЛАСТИН
НИЗКОПЛОТНЫМИ ЗАРЯДАМИ ВВ

*С. Г. Андреев¹, Р. М. Ахметшин¹, М. М. Бойко¹, Е. Ф. Грязнов¹, В. И. Колпаков¹,
В. М. Мочалова², Е. В. Никитина¹, А. В. Уткин²*

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

В докладе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования волновых процессов в стальных цилиндрических оболочках и пластинах. Экспериментальные исследования проводились методом регистрации скорости свободной поверхности оболочек и пластин с применением лазерного интерферометра VISAR. Теоретические исследования

проводились методом численного моделирования процесса взрывного нагружения оболочек и пластин.

Взрывное нагружение оболочек осуществлялось в режимах скользящего и падающего детонационных фронтов. Пластины нагружались падающим детонационным фронтом. Для взрывного нагружения использовались различные ВВ с плотностью от $0,3 \text{ г/см}^3$ до $1,0 \text{ г/см}^3$, обладающие скоростью детонации от 2600 м/с до 6000 м/с , что позволило реализовать до- и сверхзвуковые режимы нагружения.

В результате исследований установлено существенное изменение характера набора скорости свободной поверхности оболочек и пластин при переходе от дозвукового к сверхзвуковому режиму нагружения. Зафиксировано также изменение амплитуды упругого предвестника в зависимости от параметров нагружения и толщины стенки оболочки.

Численное моделирование процессов, выполненное в двумерной постановке, позволило объяснить особенности экспериментально полученных профилей скорости свободной поверхности.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕГА ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАНЕТАХ. ОБРАЗОВАНИЕ СПУТНИКОВ

В. Ф. Анисичкин¹, Э. Р. Прууэл^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет*

Есть класс задач в физике высоких плотностей энергии и в приложениях, где, с одной стороны, требования по точности описания поведения вещества невысоки, с другой стороны, уравнение должно устойчиво работать в широком диапазоне условий. Одна из таких задач – моделирование последствий столкновений небесных тел и взрывов в недрах планет.

Методы молекулярной динамики с классическими парными потенциалами взаимодействия представляются достаточно адекватными для таких задач. Так в области умеренных давлений, где есть надежные экспериментальные данные о поведении вещества, удастся добиться количественного соответствия. В области экстремальных давлений и температур, подход позволят получить только качественное соответствие.

В работе, на основе NVT ансамбля молекул, взаимодействующих с потенциалами Леннарда–Джонса и exp-6 , разработана модель уравнения состояния вещества, позволяющая вычислять давление и внутреннюю энергию в материале при заданной плотности и температуре. Для широкого ряда веществ, калибровка параметров потенциалов позволила добиться количественного соответствия с термодинамическими данными в диапазоне давлений до 1 ГПа , и с ударными адиабатами в диапазоне давлений до десятков ГПа . При использовании модели в условиях больших давлений удастся получить только качественное соответствие расчетов и экспериментальных данных.

Относительная простота модели позволила провести расчеты сложных механических течений с фазовыми переходами. Приводятся результаты моделирования взрыва в недрах планет. Получены системы с множеством мелких и относительно крупных спутников планеты, которые через миллиарды лет могли образовать систему колец, как у Сатурна, и крупные спутники типа Луны.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. С. Аракчеев^{1,2}, Г. Г. Лазарева^{2,3,4}, А. Г. Максимова⁴

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

³Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск

⁴Новосибирский государственный университет

На данный момент токамак — это самая проработанная концепция реализации управляемого термоядерного синтеза для получения энергии. Одной из ключевых проблем термоядерного реактора на основе токамака является устойчивость материалов первой стенки к воздействию плазмы. Улучшенные режимы удержания горячей плазмы в токамаках связаны с большими постоянными и периодическими импульсными потоками плазмы на диверторные пластины. Периодические импульсные мощные тепловые нагрузки наиболее опасны для механического разрушения и плавления материала диверторных пластин. Кроме того, генерация микрочастиц из-за таких нагрузок может привести к тепловому гашению плазмы. Для создания устойчивых к плазменной нагрузке материалов требуется понимание процессов, происходящих во время импульсных нагрузок. Поэтому в экспериментах нужно измерять не только финальный результат воздействия, но и динамику быстрых процессов, а также проводить их моделирование.

В ИЯФ СО РАН на стенде по тестированию устойчивости материалов диверторных пластин к импульсным тепловым нагрузкам с помощью электронного пучка было обнаружено, что при импульсном тепловом воздействии существенную роль играют неоднородности, возникающие на поверхности. Неоднородности распределения температуры на облучаемой поверхности были обнаружены после образования трещин на поверхности вольфрама. Трещины образуются за счет пластической деформации прогреваемого приповерхностного слоя. При этом вокруг трещины могут возникать механические напряжения, приводящие к локальным механическим разрушениям вблизи трещины, которые мешают отводить тепло за счет теплопроводности вглубь материала. Перегрев вблизи трещин был обнаружен экспериментально. В перегретой области может при меньшей тепловой нагрузке происходить плавление и генерация микрочастиц. Для понимания связи разрушений внутри материала с распределением и динамикой температуры вблизи трещины проведено математическое моделирование распространения тепла вглубь материала. Результаты вычислительных экспериментов сопоставлены данные измерений. Другой вид неоднородностей на поверхности возникает после плавления. На поверхности расплава были обнаружены мелкоструктурные возмущения светимости. Есть несколько гипотез образования таких коротковолновых возмущений на поверхности расплава, для проверки которых в математическую модель введен учет плавления и движения расплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН № 15, проект № 15.9.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ПУАЗЕЙЛЯ В ЗАКРЫТОМ ПЛОСКОМ НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Д. Г. Архипов, Г. А. Хабахпашев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Расслоенные течения несмешивающихся несжимаемых жидкостей активно используются в современных технологиях. Один из режимов таких течений характеризуется концентрическим расположением двух жидкостей в круглой трубе: как правило, если жидкость с большей динамической вязкостью занимает 60–90 % сечения трубы, то она движется в ядре потока. Потери давления в кольцевом режиме при большом отношении вязкостей значительно ниже, чем в отсутствие более текучей жидкости, что упрощает транспортировку сильновязких жидкостей на большие расстояния. Устойчивость кольцевого режима в горизонтальных и слабонаклонных трубах в значительной степени зависит от относительной разницы плотностей жидкостей (с ее ростом усиливается роль неустойчивости Рэлея–Тейлора), поэтому наиболее интересны пары веществ с близкими значениями плотностей.

Полный анализ линейной устойчивости кольцевого режима течения представляет собой достаточно трудоемкую задачу, что побуждает исследователей рассматривать более простые модельные постановки [1]. Например, в этой связи детально изучают плоскопараллельные двухслойные течения в плоских горизонтальных и наклонных каналах. Несмотря на значительное число работ, посвященных данной проблеме (см., например [2]) некоторые особенности поведения, так называемой, межфазной моды возмущений в случае малой разницы плотностей жидкостей были отмечены относительно недавно [3]. Выяснилось, что в асимптотике высоких чисел Рейнольдса межфазная мода соответствует внутренней гравитационной волне на границе раздела жидкостей, нейтральная устойчивость которой сохраняется с ростом скорости стационарного течения вплоть до возникновения критического слоя в одной из жидкостей. В дальнейшем были учтены и сдвиговые моды течения, неустойчивость которых часто является доминирующей.

В настоящей работе на основе численного решения системы уравнений Орра–Зоммерфельда методом Галеркина с базисом функций в виде полиномов Чебышева получен глобальный спектр линейных возмущений задачи. Показано, что при малой относительной разнице плотностей жидкостей (и, соответственно, малой скорости внутренних гравитационных волн) возможны течения, единственным механизмом неустойчивости которых является неустойчивость критического слоя. Проанализированы различия влияний слабого наклона канала и продольного градиента давления на спектр собственных значений системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joseph D. D., Renardy Y. Y. *Fundamentals of two-fluid dynamics*. Springer. 1992
2. Tilley B. S., Davis S. H., Bankoff S. G. *Linear stability theory of two-layer fluid flow in an inclined channel*. Phys. Fluids. 1994. V. 6. Pp. 3906–3922.
3. Архипов Д. Г., Хабахпашев Г. А. *Моделирование длинных нелинейных волн на границе раздела горизонтального потока двухслойной вязкой жидкости в канале*. Изв. РАН. МЖГ. 2005. № 1. С. 143–158.

КОМПАКТНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. Г. Афонин¹, В. Г. Бутов¹, С. В. Синяев¹, В. А. Солоненко¹, Г. А. Швецов²,
Г. В. Носов³, М. Г. Носова⁴

¹НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Энергетический институт Томского политехнического университета, Томск

⁴Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Одной из ключевых проблем при создании электромагнитных ускорителей твердых тел является разработка специализированного компактного источника энергии для генерации мощного импульса тока в ускорителе. Используемые в некоторых проектах в качестве источника энергии конденсаторные батареи имеют ряд недостатков, связанных с относительно невысокими удельными весогабаритными энергетическими характеристиками и ограниченными возможностями в реализации частотного режима работы. В данном докладе представлены результаты численного исследования характеристик компактной электроэнергетической установки на основе импульсного МГД-генератора и определены ее возможности в качестве источника мощных импульсов тока для скорострельного рельсового ускорителя твердых тел. Установка состоит из импульсного МГД-генератора и повышающего ток трансформатора со сверхпроводящими первичной и вторичной обмотками [1]. Обмотки трансформатора выполняют функцию индуктивного накопителя энергии с одновременным многократным усилением тока МГД-генератора. После накопления энергии вторичная обмотка подключается к ускорителю с помощью коммутационных устройств с размыкающим и замыкающим ток ключами. Вывод из вторичной обмотки энергии, остающейся после завершения процесса метания, осуществляется с помощью дугогасящего сопротивления на выходе из ускорителя [2]. Рассчитаны варианты установки с МГД-генератором на пороховом топливе нового поколения электрической мощностью 50 МВт с запаасаемой энергией в трансформаторе 50 и 100 МДж при токах до 500 кА. Определены время работы, расход и масса плазмообразующего топлива, основные характеристики МГД-генератора и сделана оценка массогабаритных параметров накопителя, включая параметры трансформатора. Методами математического моделирования исследованы особенности согласованной работы такой установки с многорельсовым ускорителем твердых тел [3] при их последовательном ускорении в режиме “перехвата тока” [4]. Показано, что исследуемая конструкция компактного импульсного накопителя энергии может обеспечить высокоскоростное метание тел со сверхвысокой скорострельностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. *Накопители энергии*. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
2. Афонин А. Г., Бутов В. Г., Синяев С. В., Швецов Г. А. *Высокоскорострельный режим последовательного ускорения нескольких тел в рельсовом ускорителе*. VIII Международная конференция “Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике”. Тезисы докладов. Новосибирск. 2015. С. 171–172.

3. Poltanov A. E., Kondratenko A. K. et. al. *Multi-Turn Railguns: The Concept Analysis and Experiments*. IEEE Trans. on Magn., 2001. V. 37, No. 1. Pp. 456–461.
4. Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П., Синяев С. В., Солоненко В. А., Швецов Г. А., Якушев А. А. *Анализ работы многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с прямым питанием от импульсной МГД-установки*. ПМТФ. 2015. № 5. С. 91–101.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ПОРОУПРУГОЙ СРЕДЕ

А. Н. Байкин, С. В. Головин

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

Трещины гидроразрыва играют большую роль в технологиях интенсификации добычи углеводородов, а также имеют место в ряде природных процессов. Распространение трещины гидроразрыва пласта (ГРП) обусловлено закачкой в нее вязкой жидкости, которая создает давление на стенках достаточное для преодоления горного давления и разрыва горной породы. Процесс развития трещины обусловлен несколькими факторами: течением вязкой жидкости по трещине, упругой реакцией стенок трещины, фильтрацией жидкости через стенки трещины в пласт и разрывом породы.

В [1] была представлена численная модель трещины гидроразрыва в пороупругой среде в условиях плоской деформации на основе уравнений Био [2]. Данная модель позволяет определить как поровое давление в пласте, так и деформацию горной породы совместно с раскрытием трещины и давлением в ней. Численное решение задачи проводилось методом конечных элементов с помощью модификации алгоритма из [3]. Преимуществами предложенного подхода является отсутствие необходимости явно отслеживать фронт трещины и перестраивать сетку на каждом временном шаге.

В настоящей работе на основе алгоритма [1] представлена трехмерная численная модель для планарной трещины ГРП в неоднородной по физическим свойствам пороупругой среде. В [1] было показано, что поровое давление может существенно влиять на размеры трещины и направление ее распространения благодаря тому, что фильтрующаяся из трещины жидкость изменяет НДС вблизи трещины. В особенности это проявляется в неоднородных средах с контрастом сжимающим напряжений, проницаемости и других физических свойств пласта. Представленная в работе модель позволяет анализировать аналогичные эффекты, но в рамках трехмерной постановки задачи. В работе показано, что неоднородность физических свойств пласта может существенно сказываться на пространственном распространении трещины, в частности, симметрии ее ветвей, отношению характерных размеров по высоте и длине.

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ (проект НШ–8146.2016.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00610).

ЛИТЕРАТУРА

1. Baykin A. N., Golovin S. V. *Modelling of hydraulic fracture propagation in inhomogeneous poroelastic medium*. J. Phys.: Conf. Ser. 2016 V. 722. 012003

2. Biot M. A. *Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid*. Journal of Applied Physics. 1955. V. 26. P. 182–185.
3. Shelukhin V. V., Baikov V. A., Golovin S. V., Davletbaev A. Y., Starovoitov V. N. *Fractured water injection wells: Pressure transient analysis*. Int. J. Sol. Struct. 2014. V. 51. P. 2116–2122.

К ОЦЕНКЕ УГЛА СКРУЧИВАЕМОГО СТЕРЖНЯ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА

И. А. Банщикова

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

Для оценки результатов численного моделирования кручения стержней, вырезанных в продольном направлении из трансверсально-изотропного при ползучести материала [1, 2] получены приближенные оценки скорости угла закручивания θ . Предполагается, что трансверсально-изотропный сплав обладает пониженной сопротивляемостью деформациям ползучести в направлении под углом 45° к направлению нормали плиты, т.е. интенсивность процесса ползучести при растяжении образцов, вырезанных под углом 45° к направлению нормали плиты выше, чем при растяжении образцов, вырезанных в продольном, поперечном и по нормали плиты направлениях. Для численного моделирования использовались конечные элементы Beam189 и Solid45 комплекса Ansys. Вариационное уравнение скручиваемого стержня имеет вид [3]:

$$\delta I_1 = \delta \int \int \left(\frac{n}{1+n} G^{(n+1)/n} - \theta \left(\frac{x_1 \eta_{23}}{2A_{23}} + \frac{x_2 \eta_{13}}{2A_{31}} \right) G^{(1-n)/n} \right) dx_1 dx_2 = 0$$

или

$$\delta I_2 = \delta \int \int \left(\frac{1}{1+n} T^{n+1} - 2\theta F \right) dx_1 dx_2 = 0,$$

где $G = T^n$, $G = (\eta_{13}^2/(2A_{31}) + \eta_{23}^2/(2A_{23}))^{0,5}$, $T = (2A_{23}\sigma_{23}^2 + 2A_{31}\sigma_{13}^2)^{0,5}$. Здесь σ_{13} , σ_{23} — компоненты напряжений, A_{31} , A_{23} — коэффициенты анизотропии при ползучести, n — показатель ползучести одинаков для всех направлений и не зависит от знака прикладываемой нагрузки. Скорости деформаций ползучести есть $\eta_{13} = W_{,1} - \theta x_2$, $\eta_{23} = W_{,2} + \theta x_1$. Предположив, что функция деформации W аналогично случаю анизотропной упругости приближенно имеет вид $W(x_1, x_2) = C_1 x_1 x_2$, можно определить C_1 , при котором достигается минимум $I_1(C_1)$, и получить нижнюю оценку скорости угла закручивания. Взяв в качестве функции напряжений $F(x_1, x_2) = C_2 F_0(x_1, x_2)$, где $F_0(x_1, x_2)$ функция напряжений при установившейся ползучести круглого стержня из изотропного материала, можно определить C_2 , при котором $I_2(C_2)$ достигает минимума, и получить простейшую верхнюю оценку скорости угла закручивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-07631-а, 16-08-00713-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Банщикова И. А., Цвелодуб И. Ю., Петров Д. М. *Деформирование элементов конструкций из сплавов с пониженной сопротивляемостью деформациям ползучести в сдвиговом направлении*. Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2015. Т. 157. кн. 3. С. 34–41.

2. Banshchikova I. A., Petrov D. M., Tselodub I. Yu. *Torsion of circular rods at anisotropic creep*. Journal of Physics: Conf. Series. 2016. V. 722. № 1. 012004.
3. Качанов Л. М. *Теория ползучести* М.: Физматгиз. 1963. 455 с.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ДО РАЗРУШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНО НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

И. А. Банщикова¹, И. В. Любашевская^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

Проведено исследование продолжительности деформирования ряда конструкций до разрушения с применением кинетической теории ползучести, учитывающей накопление повреждений. В [1] для кольцевых осесимметрично нагруженных пластин получено время начала разрушения с использованием в качестве критериев длительной прочности интенсивности напряжений и максимального касательного напряжения. В первом случае для расчета используется метод конечных элементов, а во втором решение задачи сводится к решению аналогичной задачи в предположении установившейся ползучести материала. Временем начала разрушения считается момент, когда в некоторой области конструкции накопленные повреждения достигают критического значения (первая стадия скрытого разрушения).

Предложенная методика расчета обобщена для других элементов конструкций с различными граничными условиями [2] — трубы под действием внутреннего давления, вращающиеся диски и т.д. В [3] с использованием этой методики исследована зависимость длительности до разрушения с учетом двухстадийности толстостенных сосудов (труб), нагруженных внутренним давлением, от толщины стенки и используемого варианта кинетической теории ползучести. Вторая стадия — это распространение фронта разрушения и полное разрушение тела.

Апробированная методика [1-3] применена к расчету с учетом двух стадий напряженно-деформированного состояния и длительности до разрушения вращающегося диска, исследована продолжительность стадий в зависимости от выбора варианта кинетической теории ползучести и геометрических размеров диска. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что продолжительность стадии распространения фронта разрушения может составлять от нескольких десятых до десятков процентов от времени скрытого разрушения в зависимости от выбора варианта теории ползучести, критерия длительной прочности, самого объекта исследования и его геометрических размеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-07631-а, 16-08-00713-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Банщикова И. А. *Напряженно-деформированное состояние и длительность до разрушения кольцевых пластин в условиях ползучести*. Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 4. С. 359–368.
2. Банщикова И. А., Никитенко А. Ф. *Ползучесть осесимметрично нагруженных пластин с учетом накопления повреждений в их материале*. ПМТФ. 2006. Т. 47. № 5. С. 156–168.

3. Никитенко А. Ф., Любашевская И. В. *Долговечность сосудов высокого давления*. ПМТФ. 2007. Т. 48. № 5. С. 173–182.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ

В. А. Батищев, В. А. Гетман

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

В докладе приведены результаты расчетов осесимметричного стационарного течения жидкости в термогравитационном пограничном слое вблизи свободной границы, на которой задано неравномерное распределение температуры. Решение построено на основе уравнений движения теплопроводной жидкости в приближении Обербека-Буссинеска при отсутствии эффекта Марангони. Предполагается, что вне пограничного слоя имеется внешний незакрученный поток, который описывается уравнениями движения невязкой жидкости. Температура и давление в жидкости зависят от радиальной координаты по квадратичному закону. При малых коэффициентах вязкости и теплопроводности построены асимптотические разложения решения задачи.

Режимы течений жидкости делятся на два типа — основные и вторичные. Основные режимы описывают течение без вращения. Вторичные или вращательные режимы возникают в результате бифуркации основных режимов только при охлаждении свободной границы. Решение задачи зависит от двух параметров. Первый параметр пропорционален скорости внешнего невязкого потока жидкости на свободной границе. Второй параметр пропорционален температуре этой границы. Рассчитано влияние этих параметров на поле скоростей и температуру жидкости. При нагреве свободной границы найден единственный основной режим. При охлаждении границы рассчитаны два основных режима. Эти режимы существуют только, если скорость внешнего невязкого потока больше некоторого критического значения, а свободная граница локально охлаждается. Рассчитаны бифуркационные значения скорости внешнего потока жидкости в зависимости от температуры свободной границы при ее охлаждении. Вблизи точки бифуркации построена асимптотика вращательных режимов. Получено уравнение разветвления, коэффициенты которого найдены численно. В точке бифуркации от основного режима ответвляются два вращательных режима. Эти режимы отличаются друг от друга только направлением вращения.

Закключение. Показано, что при локальном охлаждении свободной границы возникает вращение жидкости в термогравитационном пограничном слое вблизи этой границы. Вне этого слоя вращение отсутствует. Вращательный эффект возникает в результате бифуркации основного стационарного режима при наличии внешнего потока жидкости. Вращательные режимы существуют, когда скорость внешнего потока не превосходит своего бифуркационного значения, включая и случай отсутствия внешнего потока жидкости. При локальном нагреве свободной границы вращательный эффект не обнаружен. Построенное решение может объяснить одну из причин возникновения торнадо.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНОГО СНАРЯДА С ПОЛЕМ ОСКОЛКОВ

С. П. Батуев, А. В. Радченко, П. А. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный университет

В работе представлены результаты экспериментального и численного исследования деформации и разрушения разнесенных стальных преград при динамическом нагружении. Исследовано разрушение металлических материалов при скоростях взаимодействия 50-3000 м/с. Производится сопоставление расчетных данных с полученными результатами эксперимента.

Целью исследования также являлось изучение влияния формы ударника (поражающего элемента) на его проникающую способность. В качестве поражающих элементов рассматривались стальные ударники различной формы: шар, правильный тетраэдр, куб, цилиндр и пластина. Масса ударников при этом была одинаковой. Мишенью являлась противотанковая граната.

Для расчетов используется авторский программный комплекс EFES и алгоритм, позволяющий проводить параллельные вычисления с высокой производительностью на геометрических объектах любой сложности. Программный комплекс, позволяет рассчитать величины продольных и поперечных деформации, схемы трещинообразования и разрушения в расчетных моделях в разные промежутки времени.

При численном моделировании в полной трехмерной постановке общее число конечных элементов (тетраэдров) составляло $1,5 \cdot 10^7$. Учитывалась “эрозия” поверхностных элементов при срабатывании ударника и пробитии преград, с учетом сохранения масс взаимодействующих тел. Поведение материалов описывалось упругопластической моделью с учетом разрушения и фрагментации взаимодействующих тел. Рассмотрен диапазон скоростей взаимодействия от 800 до 2000 м/с. В результате исследования выявлено существенное влияние формы ударника на его проникающую способность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-31-00125 мол-а, грант № 16-38-00256 мол-а), а также гранта Президента РФ МК-413.2017.1.

РАЗРУШИТЕЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВИХРИ И ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ВОКРУГ СВОЕЙ ОСИ

С. П. Баутин¹, С. Л. Дерябин¹, И. Ю. Крутова², А. Г. Обухов³

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

²НИЯУ МИФИ Снежинский физико-технический институт, Снежинск

³Тюменский индустриальный университет

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований разрушительных атмосферных вихрей, торнадо и тропических циклонов. Изложена предложенная С. П. Баутиным [1] схема возникновения и устойчивого функционирования таких потоков. Эта схема подтверждена как результатами аналитических исследований решений соответствующих начально-краевых задач для системы уравнений газовой динамики и для полной системы

уравнений Навье–Стокса [1–4], так и проведенными физическими экспериментами по созданию торнадоподобных потоков [3, 4], [5, 6].

Численно и в аналитическом виде построены решения системы уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса, моделирующие течения воздуха как в придонных частях торнадо и тропического циклона (одномерные нестационарные и трехмерные стационарные), так и в целом в этих потоках (трехмерные нестационарные). Все эти решения согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями.

Анализ геометрических, скоростных и энергетических характеристик рассматриваемых течений показал следующее: разрушительный характер имеют те, наблюдаемые в природе торнадо, у которых кинетическая энергия окружного движения в придонной части больше кинетической энергии радиального движения воздуха в этой части потока.

С помощью результатов представленных экспериментальных и теоретических исследований доказана ошибочность предложения не учитывать влияния вращения Земли вокруг своей оси для тех течений, для которых число Россби много больше единицы.

Предложены конкретные рекомендации по внедрению в практику полученных результатов разработанной газодинамической теории разрушительных атмосферных вихрей. В том числе высказаны рекомендации по раннему обнаружению торнадо и по уничтожению торнадо и тропических циклонов с разумными энергетическими затратами [7].

В результате проведенных исследований установлен новый естественно научный факт: для торнадо и для тропических циклонов математически строго доказано, что только вращение Земли вокруг своей оси есть причина возникновения закрутки в этих потоках и что кинетическая энергия вращательного движения воздуха в них берется только из кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баутин С. П. *Торнадо и сила Кориолиса*. Новосибирск: Наука, 2008.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. *Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей*. Новосибирск: Наука, 2012.
3. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. *Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты*. Новосибирск: Наука, 2013.
4. Баутин С. П., Дерябин С. Л., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. *Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси*. Екатеринбург: УрГУПС, 2017.
5. Баутин К. В., Баутин С. П., Макаров В. Н. *Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса*. Вестник УрГУПС. 2013. № 2(18). С. 27–33.
6. Баутин К. В., Макаров В. В. *Создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра*. Вестник УрГУПС. 2016. № 4(32). С. 39–45.
7. Баутин К. В., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. *Проблема предсказания и уничтожения смерча*. Технологии гражданской безопасности. 2016. Т 13. № 1 (47). С. 70–75.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ БЕЗУДАРНОГО СИЛЬНОГО СЖАТИЯ ОДНОМЕРНЫХ СЛОЕВ ГАЗА С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКЕ

С. П. Баутин, Н. С. Новаковский

Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

Математическое описание процесса безударного сжатия идеального газа до любого наперед заданного значения плотности, в том числе до бесконечной плотности представляет интерес в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза [1]. Идея безударного сжатия весьма привлекательна для получения сколь угодно больших плотностей при минимальных энергетических затратах благодаря отсутствию в течении ударных волн, т.е. сохранению в процессе сжатия начальной энтропии [2].

В работе сформулирована задача о сильном сжатии одномерного (плоского, цилиндрического или сферического) слоя идеального газа в конфигурации Р. Мизеса [3]. Следуя методу, изложенному в работе [3], численно методом характеристик строится решение задачи сильного сжатия одномерного слоя газа в обратном направлении изменения времени, то есть от момента сильного сжатия $t^* > 0$ к начальному моменту $t = 0$. Представлены результаты тестовых расчетов для случая плоской симметрии. Для случаев других симметрий приведены результаты расчетов при решении задач для разной максимальной плотности и для различных значений массы сжимаемого газа при сжатии цилиндрических и сферических слоев изнутри. То есть расчет ведется для области, радиус кривизны которой не уменьшается с течением времени. Размер сжимаемой области при этом, естественно стремится к нулю.

Для отслеживания точности численно получаемого решения для него проверяется закон сохранения. При использовании полученных решений численно восстанавливается закон движения сжимающего поршня, с помощью которого реализуется сжатие до заданных значений плотности газа. Приводятся сравнения с аналитическим законом в случае плоской симметрии.

Найденный закон движения поршня используется для построения решения при счете в прямом направлении изменения времени: от $t = 0$ к $t = t^*$. Для этой цели решается одномерная система уравнений газовой динамики в лагранжевых массовых координатах. Построение численного решения на каждом временном слое делится на две стадии. На первой — определяется положение $C+$ -характеристики, разделяющей покоящийся газ и область обобщенной централизованной волны сжатия, чья траектория известна заранее. На второй стадии с помощью неявной конечно-разностной схемы “РОМБ” [4] решение строится в области между сжимающим поршнем и $C+$ -характеристикой.

В работе представлены результаты расчетов вышеупомянутым методом задач с разными начальными данными. Варьировались: масса сжимаемого слоя, максимальная плотность, показатель адиабаты идеального газа.

По полученным результатам исследования сделан вывод о применимости изложенного подхода при решении одномерных задач о сильном сжатии одномерных слоев газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. *Явления неограниченной кумуляции*. М.: Наука, 1988.
2. Долголева Г. В., Забродин А. В. *Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

3. Баутин С. П. *Математическое моделирование сильного сжатия газа*. Новосибирск: Наука, 2007.
4. Гаджиев А. Д., Писарев В., Н. *Неявный конечно-разностный метод “Ромб” для численного решения уравнений газовой динамики с теплопроводностью*. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1979. Т 19. № 5. С. 1288–1303.

ОСОБЕННОСТИ НЕХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ АЛМАЗА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

А. Ю. Башарин, В. С. Дождиков

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Известно, что алмаз при негидростатическом нагружении в условиях полировки, экспериментах с алмазными наковальнями, индентировании разрушается нехрупко за счет перехода в другие формы углерода. Представляет интерес исследовать особенности такого разрушения в условиях высокотемпературного нагрева. В настоящей работе разрушение и нагрев алмаза возникали при его контакте с жидким углеродом с температурой выше 4800 К [1].

Островок гексагонального графита помещался на алмаз и расплавлялся импульсом лазера в гелии с давлением 25 МПа. После воздействия из образца приготавливался шлиф и исследовался в просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения ТИТАН 80–300 ТЕМ/STEM. Выяснилось, что поверхностный слой алмаза разделен на ламели, ориентированные вдоль плоскости (111), что свидетельствует о сдвиговом разрушении алмаза по плоскостям спайности. По картине изгибных контуров установлено, что ламели сильно деформированы. Они разделены прослойками ромбоэдрического графита пространственной группы R3m, между которыми расположен аморфный углерод. Найден R3m графит двух видов: текстурированный в направлении (002)г параллельно (111)а, что соответствует обычной графитации, и в виде вкраплений в алмазе полусферической формы, которые мы связываем с проявлениями взрывной графитации, описанной в [2]. Отдельные ламели имели каплевидные каверны, заполненные нанокристаллическим гексагональным графитом. Поверхность таких каверн контактировала с вспененным аморфным углеродом, а кубический алмаз вблизи каверн имел включения гексагонального алмаза, причем на границе алмаза с нанографитом признаков графитации алмаза не обнаружено.

Эти наблюдения характеризуют следующие стадии разрушения: образование сдвиговых трещин, графитация берегов трещин, перегрев образовавшихся ламелей выше температуры плавления метастабильного алмаза 4060 К [3] с одновременным их механическим нагружением за счет графитации поверхности и затем релаксация напряжений ниже давления на линии плавления метастабильный алмаз–жидкий углерод, вызывающая плавление алмаза. Спусковым механизмом релаксации служит аморфизация R3m графита за счет прохождения по нему ревербирующих волн давления, порождаемых взрывной графитацией. Пузырьки в аморфном углероде показывают, что импульс давления амплитудой не менее 15 ГПа, соответствующей давлению образования гексагонального алмаза, возникающий за счет более чем двукратного расширения углерода при плавлении, достаточен для кавитации в растянутом аморфном углероде в волнах реверберации. Плавление алмаза при параметрах ниже тройной точки алмаз–жидкость–графит и колоссальная величина сопутствующего импульсного давления являются наиболее яркими результатами этой работы, выполненной при финансовой поддержке Программы РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башарин А. Ю., Брыкин М. В., Марин М. Ю. Пути повышения точности измерений при экспериментальном определении температуры плавления графита. ТВТ. 2004. Т. 42. № 1. С. 64–71.
2. Андреев В. Д. Спонтанная графитизация и термодеструкция алмаза при $T > 2000$ К. ФТТ. 1999. Т. 41. № 4. С. 695–701.
3. Башарин А. Ю., Дождиков В. С., Кириллин А. В., Фокин Л. Р. Фазовая диаграмма углерода с областью метастабильных состояний жидкий углерод–алмаз. ПЖТФ. 2010. Т. 36. № 12. С. 39–47.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ИНЕРТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА
МАКРО И МИКРОУРОВНЕ

И. А. Бедарев¹, А. В. Федоров^{1,2}

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

²Новосибирский государственный технический университет

В работе с помощью двух подходов исследуется взаимодействие детонационной волны с инертными частицами. С одной стороны, проведено моделирование задачи на макроуровне, когда ячеистая детонационная волна гасится облаком неподвижных микрочастиц. С другой стороны, проведено исследование взаимодействия детонационной волны с неподвижными частицами на микроуровне. Газодинамика процесса моделировалась системой уравнений Навье—Стокса, описывающей движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа, с учетом многокомпонентности газовой смеси и химической кинетики. Для первой задачи система дополнялась источником членом, учитывающим сопротивление и теплообмен при взаимодействии с неподвижными сферическими частицами.

В результате разработана и верифицирована по времени задержки воспламенения, скорости детонационной волны и размеру детонационной ячейки в водородовоздушной смеси простейшая модель приведенной кинетики для описания детонации водорода в воздухе. Для анализа вопросов, связанных с подавлением ячеистой детонации, в ANSYS Fluent создана технология расчетов двумерных детонационных течений в системе реагирующая газовая смесь – инертные частицы. Проведены расчеты при различных объемных концентрациях частиц. Для малой объемной концентрации $m_2 = 10^{-4}$ не наблюдается существенного изменения структуры волны. Количество ячеек сохраняется по всей длине облака. Увеличение объемной доли частиц до $m_2 = 10^{-3}$ приводит к изменению структуры ячеистой волны и росту величины ячейки. При объемной концентрации частиц $m_2 = 10^{-2}$ происходит быстрый срыв, гашение детонации и ее вырождение в ударную волну.

На микроуровне выполнено моделирование прохождения плоской детонационной волны через решетку неподвижных частиц. Анализ ударно-волновых конфигураций показал, что в зависимости от поперечного расстояния между частицами в результате формирования скачков перед частицами в потоке за детонационной волной могут возникнуть различные режимы

взаимодействия ударных волн. При малых расстояниях – реализуется коллективная конфигурация ударных волн, которая с увеличением расстояния переходит сначала в маховское, а затем в регулярное взаимодействие. Кроме того, при прохождении волны наблюдается срыв детонации с разделением фронта на ударную волну и волну горения. Для больших продольных расстояний между частицами (малых объемных концентрациях) в дальнейшем волна горения может догнать ударную волну и произойдет реиницирование детонации. При росте объемной концентрации, как и ожидается, возможен полный срыв детонации без реиницирования последней.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 16-19-00010) и Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-08-01947 и 15-08-01723).

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА СВОЙСТВА СПЕКТРА ВОЗМУЩЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

В. Б. Бекежанова¹, О. Н. Гончарова^{2,3}

¹*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

²*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

³*Алтайский государственный университет, Барнаул*

На основе точного решения, являющегося обобщением решения Остроумова – Бириха уравнений конвекции, исследуется совместное течение испаряющейся жидкости и парогазовой смеси в горизонтальном канале. Основные уравнения, описывающие течение в газовой фазе, и граничные условия на термокапиллярной границе раздела содержат дополнительные слабые, характеризующие влияние эффектов термодиффузии и диффузионной теплопроводности. Кроме того, в условии баланса тепла на межфазной поверхности учтен массоперенос за счет испарения [1].

Анализируется структура гидродинамических и тепловых полей, а также характеристики концентрации пара в газе в зависимости от интенсивности эффектов Соре и Дюфура в условиях нормальной и пониженной гравитации. Установлено, что для рассмотренных конфигураций термодиффузионные эффекты приводят к изменению значений температуры и концентрации пара в пределах 1% и не влияют на топологию течений. Выполнена классификация типов течений по структуре профиля скорости и распределению температуры в системе.

В рамках линейной теории методом нормальных мод исследуются свойства спектра характеристических возмущений всех типов течений, которые могут быть описаны изучаемым точным решением. Изучена эволюция форм критических возмущений и механизмы неустойчивости при изменении режима основного течения в гравитационных полях разной интенсивности. Установлены характерные закономерности формирования конвективных ячеек, термокапиллярных структур и деформированных вихрей, возникающих в системе “НFE-7100 – азот”. Соответствующие структуры отвечают наиболее опасному механизму, приводящему к потере устойчивости основного течения, или условиям сосуществования термокапиллярного и конвективного механизмов. Проведены серии расчетов, позволяющие определить условия возникновения разных режимов неустойчивости, сопровождающихся формированием типичных тепловых и гидродинамических структур соответствующего вида.

Получены критические характеристики устойчивости в пространстве параметров задачи. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о пренебрежимо малом влиянии эффекта Дюфура на структуру основного течения и характеристики его устойчивости. Для некоторых конфигураций эффект Соре вызывает изменение пороговых характеристик на 10%. Построены нейтральные кривые и карты режимов неустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bekezhanova V. B., Goncharova O. N. *Stability of exact solutions describing two-layer flows with evaporation at the interface*. Fluid Dynamics Research. 2016. V. 48. № 6. 061408.

РЕЖИМЫ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ИСПАРЕНИЕМ

В. Б. Бекежанова¹, О. Н. Гончарова^{2,3}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

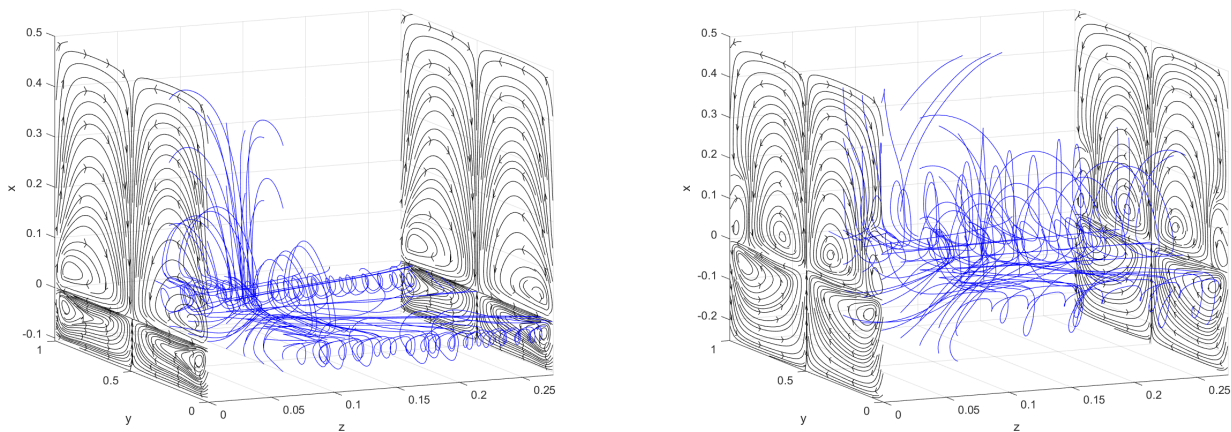
²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Алтайский государственный университет, Барнаул

Изучается трехмерная задача испарительной конвекции в системе несмешивающихся сред, имеющих общую термокапиллярную границу раздела. Представлены новые точные решения, описывающие совместное течение жидкости и парогазовой смеси в бесконечном канале с прямоугольным поперечным сечением в поле массовых сил, вызванное действием постоянного продольного градиента температуры A . Полученные решения являются обобщением решения Остроумова – Бириха уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека – Буссинеска. Компоненты вектора скорости зависят только от поперечных координат, а давление, температура и концентрация пара в газе характеризуются линейной зависимостью от продольной координаты.

Постановка задачи включает следующие соотношения на поверхности раздела: кинематическое и динамические условия, уравнение баланса массы и соотношение баланса тепловых потоков с учетом диффузионного потока массы пара, условие непрерывности температуры и касательных скоростей, а также выражение для определения концентрации насыщенного пара. Последнее является следствием уравнений Менделеева – Клапейрона и Клапейрона – Клаузиуса. На твердых стенках канала, предполагаемых теплоизолированными, заданы условия прилипания для скорости, выполняются условия отсутствия потока пара либо условие нулевой концентрации пара.

Построены альбомы трехмерных течений в системе “жидкость-газ” типа “этанол – азот” и “НФЕ7100 – азот” в канале при условии, что толщина h_f слоя жидкости меньше толщины h_g парогазового слоя ($h_f = h_g/2$ и $h_f = h_g/5$). Примеры линий тока и траекторий в системе “этанол – азот” при $A = 0.3$ показаны на рисунке. Представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных, отражающих структуру поступательно-вихревого характера движения, интенсивность испарения с границы раздела и особенности распределения температуры в канале.



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-19-20049).

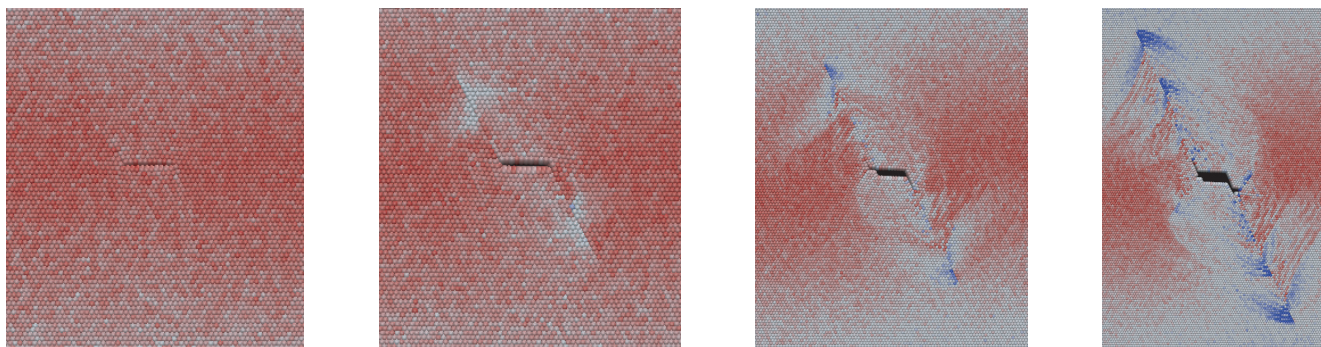
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ: ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПАКЕТЕ LAMMPS

О. Н. Белова, Л. В. Степанова

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

Выполнено моделирование развития центральной трещины конечной длины в пластине в условиях смешанного нагружения посредством метода молекулярной динамики в пакете LAMMPS. Получены и проанализированы траектории развития дефекта при различных формах смешанного нагружения. Рассмотрены эффекты воздействия температурного поля: моделирование с помощью метода молекулярной динамики проводилось при различных температурах. Выполнено сопоставление результатов, полученных с помощью метода молекулярной динамики, с макроскопическими оценками направлений развития трещины при различных формах смешанного нагружения. Углы, под которыми трещина развивается при действии различных систем нагружения, совпадают с результатами линейной механики разрушения [1] в том случае, если пользоваться критериями роста трещины, основанными на критерии минимума плотности энергии деформаций и многопараметрическим представлением поля напряжений. Предложена методика вычисления параметра смешанности нагружения в случае применения метода молекулярной динамики. Результаты численного расчета, выполненного в программном комплексе LAMMPS, приведены на рисунке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00571).



ЛИТЕРАТУРА

1. Stepanova L. V., Roslyakov P.S. *Multi-parameter description of the crack-tip stress field: Analytic determination of coefficients of crack-tip stress expansions in the vicinity of the crack tips of two finite cracks in an infinite plane medium*. International Journal of Solids and Structures. 2016. № 100-101. P. 11–28.

ОБ ЭВОЛЮЦИИ КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА ИДЕАЛЬНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В. Н. Белых

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

Абстрактное (математическое) направление в классической гидродинамике возникло во второй половине XIX века благодаря деятельности О. Коши и С. Пуассона. Впоследствии и во многом стараниями М.А. Лаврентьева, Л.В. Овсянникова, В.И. Налимова (мы упоминаем лишь некоторые из главных имен) оно развилось в предмет, известный сейчас под названием нестационарные задачи гидродинамики идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами (поверхностями).

Движение идеальной несжимаемой жидкости, описываемое уравнениями Эйлера, напрямую зависит от краевых и начальных данных — причин, — вызвавших это движение. Зачастую именно это определяет весь характер движения жидкости. При этом сам факт корректности исследуемой задачи составляет важную часть “гидродинамического” знания, извлекаемого из ее математической постановки.

В отсутствие массовых сил и поверхностного натяжения исследовано неустановившееся потенциальное движение конечного осесимметричного объема идеальной несжимаемой жидкости (“капли”), возникающее под действием начального импульса, распределенного по свободной границе области. Доказана локальная теорема существования и единственности аналитического по времени решения этой задачи. В итоге получено строгое описание начальной стадии движения капли, предшествующей ее эволюционному “разрушению” в момент потери решением аналитичности. Полученный результат может быть мотивированно использован в качестве стартового в доказательных вычислениях, организуемых посредством аналитического продолжения решения “далеко” по времени с целью отыскания особенностей, если они есть, на положительной части вещественной оси времени.

Побудительным мотивом к проведенному исследованию послужила известная гидродинамическая проблема “blow-up” свободных границ в идеальной несжимаемой жидкости. Отсутствие конструктивных представлений и неразвитость математического языка для описания режимов поведения решений в момент зарождения особенностей, является характерной чертой этих задач. Вследствие чего проблема оказывается вне компетенции современных аналитических и численных методов. Вдобавок наибольший интерес представляет проблема возникновения за конечное время особенностей у комплексных (по времени) решений 3D-уравнений Эйлера.

Интерес к указанной проблематике сформировался у автора под непосредственным влиянием Л.В. Овсянникова и К.И. Бабенко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белых В. Н. *Об эволюции конечного объема идеальной несжимаемой жидкости со свободной поверхностью*. ДАН. 2017. Т. 473. № 6. С. 1–5.
2. Белых В. Н. *Корректность одной нестационарной осесимметричной задачи гидродинамики со свободной поверхностью*. СМЖ. 2017 (в печати).

МЕТОД КОЛЛОКАЦИИ И НАИМЕНЬШИХ НЕВЯЗОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ БИГАРМОНИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ В НЕКАНОНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ

В. А. Беляев

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

Предложены и реализованы новые варианты метода коллокации и наименьших невязок для численного решения краевых задач для бигармонического уравнения в неканонических областях (в произвольном выпуклом четырехугольнике, в произвольном треугольнике и в области с криволинейной границей). Дифференциальная задача методом КНН проектировалась в пространство полиномов четвертой степени. Граничные условия для приближенного решения выписывались точно на границе расчетной области. В ячейках, которые пересекала граница, использованы законтурные точки для записи уравнений коллокации и условий согласования.

Решение задачи применялось для расчета напряженно-деформированного состояния изотропной пластины, находящейся под действием поперечной нагрузки. Оно описывается решением бигармонического уравнения

$$\frac{\partial^4 w(x_1, x_2)}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x_1, x_2)}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \frac{\partial^4 w(x_1, x_2)}{\partial x_2^4} = \frac{q(x_1, x_2)}{D}, \quad (x_1, x_2) \in \Omega \quad (1)$$

с соответствующими краевыми условиями. В (1) $w(x_1, x_2)$ — прогиб срединной поверхности пластины, $q(x_1, x_2)$ — поперечная нагрузка, $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$ — жесткость пластины при изгибе, h — толщина пластины, E, ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона изотропного материала пластины, неканоническая область Ω — проекция срединной поверхности пластины на плоскость (x_1, x_2) .

Численные эксперименты проведены с использованием различных тестовых решений исходных задач на последовательности сеток размеров 20×20 , 40×40 , 80×80 , 160×160 . Результаты расчетов показали, что приближенные решения сходятся с повышенным порядком и с высокой точностью совпадают с аналитическими решениями.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕГОРОДОК НА НЕСТАЦИОНАРНЫЙ СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН В МОДЕЛИ АВИАЦИОННОГО БАКА ПОСЛЕ ВНЕЗАПНОГО ПОДВОДА ТЕПЛА

В. С. Бердников, К. А. Митин

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет*

При проектировании и создании летательных аппаратов необходимо учитывать влияние теплового воздействия на поля температуры в тонкостенных конструкциях. При наличии градиентов температуры и неравномерной температурной деформации возникают дополнительные напряжения в элементах конструкций. В неравномерно нагретых объемах жидкости, находящихся в поле тяжести, развиваются свободно-конвективные течения. Существенное влияние на закономерности локального сопряженного теплообмена будет оказывать пространственная форма конвективных течений. В свою очередь форма конвективных течений в значительной мере зависит от конфигурации полости и расположения разогретых и охлажденных стенок и их фрагментов. Развитие авиационной техники выдвигает повышенные требования к качеству проведения расчетов термических напряжений в неизотермических тонкостенных элементах конструкций летательных аппаратов. Для оценок и точного расчета термических напряжений и анализа общего напряженно-деформированного состояния конструкции летательного аппарата необходимы достоверные знания о закономерностях сопряженного конвективного теплообмена в конструкции с нестационарными условиями на внешних и внутренних поверхностях летательного аппарата. Результатом нестационарного сложносопряженного теплообмена являются распределения температуры и термических напряжений в тонкостенных элементах конструкции. Поэтому необходимы фундаментальные исследования особенностей нестационарной термогравитационной конвекции в полостях, характерных для тонкостенных авиационных конструкций. Численно в сопряженной постановке исследован нестационарный сопряженный теплообмен в прямоугольной модели полностью заполненного тонкостенного бака разделенного внутренней вертикальной перегородкой. Боковые стенки и верхняя обшивка бака теплоизолированы с внешней стороны. Нижняя обшивка разогревается под действием равномерного теплового потока. Расчеты проведены при различных теплопроводностях внутренней перегородки бака и теплофизических параметрах топлива Т1. Рассчитаны поля температуры, как в жидкости, так и в твердых стенках бака (материал - Д16Т). Изучена эволюция конвективных течений и полей температуры после внезапного подвода тепла под основание бака. Исследовано влияние внутренних вертикальных перегородок с различной теплопроводностью на пространственную форму конвективных течений и закономерности нестационарного сопряженного теплообмена. Показано, что внутри твердых стенок конечной теплопроводности формируется неоднородное поле температуры.

Теплопроводность внутренних перегородок существенно влияет на пространственную форму конвективных течений и интенсивность конвективного теплообмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (проект III.18.2.5. Гос. Рег. 01201-3500443) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-07991).

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЛОСКОМ И КОЛЬЦЕВОМ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ

В. С. Бердников^{1,2}, К. А. Митин^{1,2}, В. А. Винокуров¹, В. В. Винокуров¹, В. А. Гришков¹

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

²*Новосибирский государственный технический университет*

Экспериментально исследованы процессы ламинарно-турбулентных переходов в плоском и кольцевом слоях жидкости, заключенных между параллельными вертикальными стенками, нагретыми до разных температур. В плоском слое жидкости толщиной 60 мм пограничные слои (ПС) на горячей и холодной стенках развиваются без непосредственного гидродинамического взаимодействия. В переходных режимах в конвективном ПС развиваются когерентные структуры (вторичные вихри) на некотором расстоянии от передней кромки стенки (при Ra_{x1K}). Вблизи горячей стенки в ПС образуются всплывающие вихри с горизонтально ориентированными образующими. Вихри теряют устойчивость в трансверсальном направлении при критическом значении Ra_{x2K} . Наблюдаются прорывы переднего фронта. Возникает подобие Λ -структур, из которых в дальнейшем возникают продольные вихри, затем термики и переход к турбулентному ПС. В кольцевом слое толщиной 12,7 мм пограничные слои гидродинамически слабо но взаимодействуют, поэтому при критических значениях числа Рэлея возникают вихри на границе встречных потоков. Переход в турбулентные режимы имеет более сложный характер из-за взаимодействия вторичных структур различной природы. Экспериментально исследованы зависимости от продольной координаты средних по времени и мгновенных локальных характеристик гидродинамических и тепловых свободноконвективных ПС в режимах ламинарно-турбулентного перехода. Изучены процессы турбулизации ядра слоев, которые оказывают обратное влияние на особенности развития ПС на стенках. Эксперименты выполнены с жидкостью с числом Прандтля $Pr=16$ в широких диапазонах чисел Рэлея. Эксперименты выполнены на стендах имеющих прозрачные рабочие участки, что позволяет проводить качественные и количественные исследования пространственной формы течений и полей скорости. Характеристики полей температуры измерялись микротермопарами. Экспериментально определить поле температуры внутри прозрачных стенок невысокой теплопроводности и исследовать влияние локального сопряженного теплообмена на локальную структуру течения невозможно. Поэтому проведены численные исследования в сопряженной постановке задачи. Численно в сопряженной постановке была воспроизведена начальная стадия ламинарно-турбулентного перехода, рассчитаны поля температуры, как в жидкости, так и в твердых вертикальных стенках. В результате появления вторичных вихрей в ПС на поверхности и внутри вертикальных стенок начинает бежать тепловая волна. Взаимодействие с низкотеплопроводной стенкой приводит к небольшому снижению интенсивности конвективных течений, но не приводит к значительным изменениям критических чисел Ra_x и длины волны вторичных вихрей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-07991а).

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ СОПРЯЖЕННЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ СО СТЕНКАМИ КОНЕЧНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОСЛЕ ВНЕЗАПНОГО НАГРЕВА ОСНОВАНИЯ

В. С. Бердников^{1,2}, К. А. Митин^{1,2}, А. И. Чепуров³

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

²*Новосибирский государственный технический университет*

³*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск*

Представлены результаты численного моделирования нестационарного сопряженного свободноконвективного теплообмена в высокой вертикальной полости со стенками конечной теплопроводности после внезапного включения подогрева снизу. Эта система рассматривается в качестве простейшей модели гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в вертикальной трещине в земной коре, после достижения ее основания головной частью геодинамического плюма. Нижний торец прямоугольной расчетной области внезапно нагрет до заданной температуры, верхний торец остается при начальной температуре системы (холодный). Внешние поверхности вертикальных стенок теплоизолированы. На жестких границах системы задано условие равенства нулю всех компонент скорости. На внутренних поверхностях вертикальных стенок задано условие идеального теплового контакта, т.е. неразрывность полей температуры и равенство тепловых потоков на границах раздела жидкость - твердая стенка. Методом конечных элементов решены уравнения термогравитационной конвекции в приближении Буссинеска в переменных температура, вихрь и функция тока. Изучена пространственная форма конвективных течений и поля температуры в жидкости и в твердом теле. Показано, что в придонной области развивается несимметричное двухвихревое течение и наблюдается колебательный процесс. Поочередно меняется интенсивность в правом и левом вихре. Формируется восходящий поток горячей жидкости, который колеблется между стенками, поочередно касаясь и отражаясь от них. Навстречу восходящему потоку вниз так же периодически во времени и в пространстве проваливаются вихри более холодной жидкости. Такого типа колебания происходят и в практически установившемся нестационарном течении, при котором в верхней части периодическая во времени пространственная структура течения не меняется. В результате чего в жидкости и в твердых стенках бежит тепловая волна.

Полученные данные позволяют рассчитать мгновенные сопротивления на стенках и потери энергии на всех стадиях развития течения. Можно рассчитать рост среднемассовой температуры жидкости и рост давления за счет ее теплового расширения. По полям температуры и градиентам температуры в стенках разлома можно рассчитать термические напряжения. В целом полученные данные позволяют представить изменение энергетики процесса во времени и анализировать возможные процессы разрушения (эрозии) стенок разлома из-за нестационарных полей термических напряжений и динамического воздействия нестационарного потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-07991а).

ОБТЕКАНИЕ КРУГОВОГО КОНУСА РЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ

Э. А. Бибердорф, А. М. Блохин

*Новосибирский государственный университет
Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск*

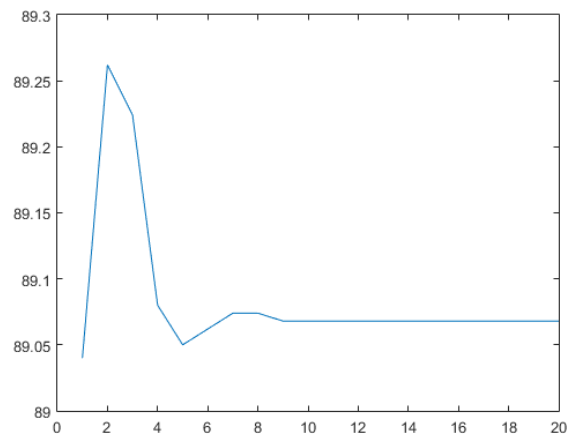
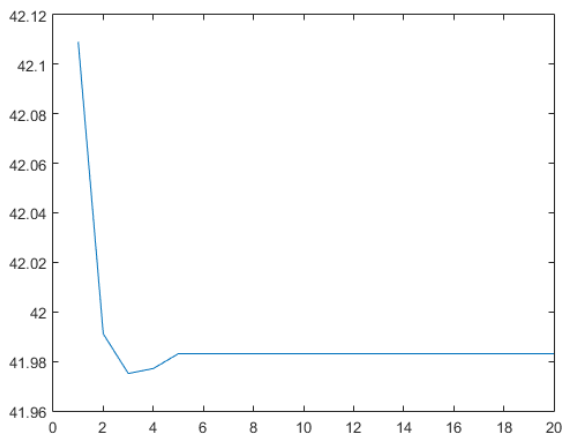
Работа посвящена разработке конечно-разностного алгоритма для нахождения стационарного решения задачи об обтекании кругового конуса газом Ван-дер-Ваальса, характеризующемся уравнениями состояния

$$p = \frac{RT}{V - V_0} - \frac{A}{V^2}, \quad e = c_V^* T \left(1 - \frac{A_1 T}{2} \right) - \frac{A}{V}.$$

Здесь p , V и T — давление, удельный объем и температура газа соответственно, R — газовая постоянная, e — внутренняя энергия, V_0 ($V > V_0$), A , c_V^* и A_1 — некоторые константы.

В этом случае уравнения газовой динамики вследствие симметрии приобретают вид системы ОДУ четвертого порядка. Данная система дополняется одним краевым условием на поверхности конуса — условие непротекания, а также четырьмя условиями на фронте ударной волны, которые являются следствиями условий Рэнкина-Гюгонно. Таким образом формулируется краевая задача для системы ОДУ, где одна из границ (угол ударной волны) также является неизвестной.

Для конструирования алгоритма используем взгляд на эту проблему, как на обычную краевую задачу с одним дополнительным условием, которое используется для итерационного уточнения угла ударной волны. Применяется оригинальный метод построения первого приближения угла ударной волны, который позволяет получить приближение достаточно близкое к искомому углу и обеспечивает быструю сходимость итераций. По сравнению с описанным в работе [1] методом, новый алгоритм отличается быстрой сходимостью, он полностью автоматизирован и требует гораздо меньше вычислительного времени и ресурсов. Примеры приближения угла ударной волны в зависимости от номера итерации приведены на рисунке.



ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин А. М., Бибердорф Э. А. *Численное решение задачи о стационарном обтекании конуса реальным газом*. Вычисл. технологии. 2015. Т. 20. № 2. С. 29–43.

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ В ПРИОСЕВОЙ ЗОНЕ

А. М. Блохин, Р. Е. Семенко

*Новосибирский государственный университет
Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН*

Рассматривается задача о вихревом движении полимерной жидкости. За основу задачи берется реологическая модель, являющаяся модификацией известной модели Покровского-Виноградова [1]. С ее помощью формулируется нестационарная математическая модель, описывающая вихревое движение несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости в приосевой цилиндрической зоне.

Далее в работе рассматривается стационарный случай модели. При определенных предположениях находятся и исследуются некоторые стационарные решения. Наконец, подробно рассматривается один частный случай нестационарной модели, при котором распределение давления жидкости вдоль продольной оси цилиндра не зависит от времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтухов Ю. А., Гусев А. С., Пышнограй Г. В. *Введение в мезоскопическую теорию текучих полимерных систем*. Барнаул.: АлтГПА, 2012.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ПОЛИМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ

А. М. Блохин^{1,2}, Б. В. Семисалов^{1,3}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

³Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Стремительное развитие современных технологий аддитивного производства изделий (3D печати) с использованием полимерных материалов требует разработки и анализа новых математических моделей, описывающих с высокой степенью достоверности течения растворов и расплавов полимеров в каналах печатающих устройств. В настоящей работе за основу берется модификация известной реологической мезоскопической модели Покровского-Виноградова

(см. [1]), с помощью которой рассчитываются стационарные неизотермические режимы течения полимерной жидкости, близкие по своим особенностям к течениям Пуазейля для уравнений Навье-Стокса.

В работе исследованы способы управления потоком полимерной жидкости с помощью тепловых и механических воздействий в каналах с сечениями прямоугольной, круглой и эллиптической форм [2], [3], а также в каналах с тонким нагревательным элементом. С этой целью для каждой рассмотренной формы сечения получены разрешающие уравнения. В предположении о малости значений феноменологического параметра β , характеризующего анизотропию среды, удается найти линейную часть разложения неизвестных функций модели в ряд по параметру β . В случае произвольных β ($0 < \beta < 1$) получены квазилинейные краевые задачи Дирихле для уравнений эллиптического типа с неизвестной скоростью течения.

Для поиска приближенных решений полученных краевых задач разработан численный метод, основанный на приближениях без насыщения К.И. Бабенко (см. [4], [5]). Метод использует приближения неизвестных функций интерполяционными полиномами с узлами Чебышева и позволяет получать высокую точность в задачах с заведомо гладкими решениями при небольшом количестве узлов. Проведен анализ особенностей течений в широком диапазоне значений параметров задач, в том числе в областях предельных значений, где классические численные методы не работают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтухов Ю. А., Гусев А. С., Пышнограй Г. В. *Введение в мезоскопическую теорию текучести полимерных систем*. Барнаул: АлтГПА, 2012.
2. Блохин А. М., Семисалов Б. В. *Стационарное течение несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости в канале с эллиптическим сечением*. Сибирский журнал индустриальной математики. 2014. Т. XVII. № 4 (60). С. 38–47.
3. Блохин А. М., Семисалов Б. В., Шевченко А. С. *Стационарные решения уравнений, описывающих неизотермические течения несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости*. Мат. моделирование 2016. Т. 28, № 10. С. 3–22.
4. Бабенко К. И. *Основы численного анализа*. М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2002.
5. Семисалов Б. В. *Быстрый нелокальный алгоритм решения краевых задач Неймана-Дирихле с контролем погрешности*. Выч. мет. Программирование. 2016. Т. 17 № 4. С. 500–522.

АНАЛОГ ТЕЧЕНИЯ ПУАЗЕЙЛЯ ДЛЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ С ОБЪЕМНЫМ ЗАРЯДОМ. АСИМПТОТИКА СПЕКТРА ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ПРОБЛЕМЫ

А. М. Блохин, Д. Л. Ткачев

*Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

В работах [1], [2] доказана линейная неустойчивость аналога течения Пуазейля для модифицированной базовой реологической модели Виноградова–Покровского [3]. Оказывается,

что в качественном отношении эта модель хорошо описывает течения растворов и расплавов полимеров в реальных технологических условиях, например, когда граница области обладает сложной геометрией [4].

В данной работе исследуется линейная устойчивость новой математической модели, учитывающей постоянные разности температур и потенциалов, приложенных к электродам (катоде и аноду) бесконечного плоского конденсатора. В качестве основного решения вновь рассматривается аналог течения Пуазейля [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин А. М., Егитов А. В., Ткачев Д. Л. *Линейная неустойчивость решений математической модели, описывающей течения полимеров в бесконечном канале*. ЖВМиМФ. 2015. Т. 55. № 5. С. 850–875.
2. Блохин А. М., Ткачев Д. Л. *Линейная асимптотическая неустойчивость стационарного течения полимерной среды в плоском канале в случае периодических возмущений*. Сиб. журн. инд. матем. 2014. Т. XVII. № 3. С. 12–25.
3. Алтухов Ю. А., Гусев А. С., Пышнограй Г. В. *Введение в мезоскопическую теорию текучих полимерных систем*. Барнаул: Алт. ГПА, 2012.
4. Кошелев К. Б., Пышнограй Г. В., Кузнецов А. Е., Толстых М. Ю. *Зависимость гидродинамических характеристик течения полимерного расплава в сходящемся канале от температуры*. Механика композиционных материалов и конструкций. 2016. Т. 22. № 2. С. 175–191.
5. Блохин А. М., Ткачев Д. Л., Егитов А. В. *Асимптотика спектра для линеаризованной задачи об устойчивости стационарных течений несжимаемой полимерной жидкости с объемным зарядом*. ЖВМиМФ. 2017 (принята в печать).

О ФРЕДГОЛЬМОВОСТИ ОБЩЕЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА НА ПЛОСКОСТИ

Ю. А. Боган

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

Для линейного дифференциального уравнения эллиптического типа с двумя независимыми переменными порядка $2m$ и простыми комплексными характеристиками

$$L(u) = L\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)u = 0,$$

где

$$L(\xi, \eta) = \sum_{k=0}^{2m} a_k \xi^k \eta^{2m-k}$$

– однородный полином с постоянными вещественными коэффициентами степени $2m$ и такой, что $L(\xi, \eta) > 0$ для любых вещественных ξ, η . Рассмотрена краевая задача:

$$B_h(u) = \sum_{i=1}^{n_h} a_{ik} \frac{\partial^{n_h} u}{\partial x^{n_h-i} \partial y^i} \Big|_{\partial Q} = g_h(s), h = 1, 2, \dots, m.$$

Предполагается, что система граничных операторов нормальна; т.е., что порядок B_k не равен порядку B_l , если $k \neq l$. Доказано, что при этом краевая задача Фредгольмова при выполнении условия Лопатинского и ее решение можно представить в виде суммы регулярных потенциалов, минуя этап приведения к системе сингулярных интегральных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бицадзе А. В. *Краевые задачи для эллиптических уравнений второго порядка*. М.: Наука, 1966.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕКЛАССИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

А. Н. Богданов¹, В. Н. Диесперов², В. И. Жук³

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

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

³Вычислительный центр им. А. А. Дородницына, Москва

Проведенное без малого тридцать лет назад исследование устойчивости неклассического (с самоиндуцированным давлением) пограничного слоя [1] ответило, как стало ясно в дальнейшем, не на все вопросы. Продолжение исследований дает новые важные результаты в этой области.

Обнаруженное [2] бифуркационно подобное качественное перестроение дисперсионных кривых при изменении трансзвукового параметра подобия (отклонения местной скорости течения от звуковой) происходит без их пересечения - его нет ни при каком значении указанного параметра, поэтому дисперсионные кривые не имеют точек ветвления [3], что объясняет сравнительно позднее обнаружение этого явления и трудности аналитического исследования перестроений такого рода. Обнаружение новых ветвей дисперсионных кривых важно для определения условий ламинарно-турбулентного перехода на сверхзвуковых скоростях взаимодействия, доказательство устойчивости сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине [4] воспринималось как парадокс.

Важным этапом для разработки адекватной модели процессов нестационарного свободно-вязко-невязкого взаимодействия стало уяснение вырожденности классической трехпалубной модели для трансзвукового режима и формулировка модифицированной (регулярной) модели [5].

Сравнение результатов, даваемых классической и модифицированной моделями показало, что при использовании модифицированной трехпалубной модели нижняя ветвь кривой нейтральной устойчивости имеет качественно отличный от получаемого на классической модели характер поведения, и существование единственного нейтрального значения является исключительным случаем (их либо два, либо такое значение отсутствует совсем [6]), что свидетельствует о гораздо большей сложности условий устойчивости/неустойчивости течения и самого характера неустойчивости, чем это полагалось ранее.

Показано, что считавшаяся ранее однозначной зависимость частоты возмущения от волнового числа (за исключением небольшого диапазона малых его значений) таковой не является [7], для приложений это означает, в частности, что задача управления пограничным слоем при помощи вибратора [4] становится качественно более сложной.

Вышеуказанные результаты получены для линейного профиля невозмущенной скорости. Во избежание абсолютизации частных решений требуется изучение и других вариантов течения в пограничном слое.

Малоизученным остается поведение нелинейных возмущений взаимодействующих течений даже в слабонелинейном приближении, хотя в этом направлении получен ряд внушающих оптимизм результатов [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжов О. С., Савенков И. В. *Об устойчивости пограничного слоя при трансзвуковых скоростях внешнего потока*. ПМТФ. 1990. № 2. С. 65–71.
2. Ryzhov O. S, Bogdanova E. V. *Boundary-layer instability in transonic range of velocities, with emphasis on upstream advancing wave packets*. IUTAM Symposium on One Hundred Years of Boundary Layer Research Solid Mechanics and Its Applications. 2006. V.129. Session 2. Pp.135–144.
3. Богданов А. Н., Диесперов В. Н., Жук В. И. *Об особых точках поля дисперсионных кривых при исследовании устойчивости трансзвукового пограничного слоя*. ДАН. 2013. Т. 449. № 4. С. 414–415.
4. Терентьев Е. Д. *Нестационарные задачи пограничного слоя со свободным взаимодействием*. Дисс. на соискание уч. степ. докт. физ.-мат. наук. М.: ВЦ РАН, 1986. 202 с.
5. Богданов А. Н., Диесперов В. Н. *Моделирование нестационарного трансзвукового течения и устойчивость трансзвукового пограничного слоя*. ПММ. 2005. Т. 69. В. 3. С. 394–403.
6. Богданов А. Н., Диесперов В. Н., Жук В. И. *Асимптотика нижней ветви кривой нейтральной устойчивости для трансзвукового взаимодействующего пограничного слоя на плоской пластине*. ДАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 160–162.
7. Богданов А. Н., Диесперов В. Н., Жук В. И. *Асимптотики дисперсионных кривых в задачах нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия на трансзвуковых скоростях*. ДАН. 2017. В печати.
8. Жук В. И. *Волны Тольмина-Шлихтинга и солитоны*. М.: Наука, 2001.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПРИСТЕННОГО ТЕЧЕНИЯ И ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НЕСИММЕТРИЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПРЯМОГО ДВУГРАННОГО УГЛА

А. В. Бойко¹, С. В. Кириловский¹, Ю. М. Нечепуренко², Т. В. Поплавская¹

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

²Институт вычислительной математики РАН, Москва

В работе рассматривается задача дозвукового несимметричного обтекания модели двугранного угла, образованного из двух пересекающихся друг с другом пластин, с целью изучения взаимодействия двух смежных плоских пограничных слоев для последующего использования полученных данных при моделировании ламинарно-турбулентного перехода. Главную сложность при этом представляет нетривиальная геометрия течения, особая структура

основного ламинарного потока и наличие нескольких типов неустойчивых возмущений, которые могут быть ответственны за переход к турбулентности. Работа включает разработку теории и соответствующих численных алгоритмов, а также, расчеты и их сопоставление с результатами численного моделирования основного ламинарного течения в угле на основе программ расчета полных уравнений Навье–Стокса, а также с экспериментальными данными по ламинарно-турбулентному переходу в угловых конфигурациях.

Выведены уравнения в приближении пограничного слоя для несимметричных автомодельных течений вязкой несжимаемой жидкости вдоль прямого неограниченного угла с продольным градиентом давления течения. Проанализировано асимптотическое поведение решений вдали от вершины угла. Получены решения для двух типов асимптотического поведения. Разработаны программы расчета основного ламинарного течения в угле с помощью автомодельных уравнений и анализа линейной устойчивости этого течения. Проведено сравнение основного течения и данных о переходе к турбулентности, полученных на основе расчета полных уравнений Навье–Стокса и автомодельных уравнений, а также сравнение с экспериментальными данными [1].

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-08-00354 “Установление базовых критериев положения ламинарно-турбулентного перехода для течения вдоль прямого двугранного угла”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nomura Y. Terada H. *On the transition of corner boundary layer*. Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. 1978. V. 21. November. Pp. 111–117.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТКЛИКА МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ НА УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ

А. В. Болеста, В. М. Фомин

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

В докладе приводится сравнительный молекулярно-динамический (МД) анализ поведения при ударно-волновом нагружении двух нанокристаллических металлов, обладающих различными кристаллическими структурами при обычных условиях. Это медь и титан с гранецентрированной кубической (ГЦК) и гексагональной плотноупакованной решеткой (ГПУ) соответственно. В то же время оба эти материала демонстрируют твердотельный фазовый переход при определенной силе ударной волны. Структура меди меняется на объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку при давлении в ударной волне большем 100 ГПа, что было предсказано нами ранее теоретически и экспериментально может быть показано в настоящий момент лишь косвенным образом. Смена кристаллической структуры титана демонстрировалась экспериментально и происходит при давлении большем примерно 30 ГПа. МД расчеты позволяют выявить различия в структуре и ширине фронта ударной волны в этих двух металлах. Большое внимание было уделено исследованию механизмов деформации и структурных превращений в режимах нагружения вблизи фазовых переходов. Также показана

возможность использования фазового перехода за ударной волной с дальнейшей разгрузкой для конструирования нанокристаллических материалов с уменьшенным размером зерна.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММ НАЙКВИСТА ДЛЯ АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ ВАН ДЕР ПОЛЯ — ДУФФИНГА, ОПИСЫВАЮЩЕГО ЛОКАЛЬНУЮ ГЕМОДИНАМИКУ МОЗГА

Е. Е. Борд¹, А. А. Черевко^{1,2}, А. К. Хе^{1,2}, В. А. Панарин³, К. Ю. Орлов³, А. П. Чупахин^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Сибирский Федеральный Биомедицинский Исследовательский Центр Имени Академика Е.Н. Мешалкина, Новосибирск

Релаксационные колебания в сосудистой системе головного мозга описываются обобщенным уравнением Ван-дер-Поля — Дуффинга [1]. Изучаются свойства решений данного уравнения для разных пациентов с учетом особенностей их сосудистой системы.

Уравнение связывает гемодинамические параметры — безразмерные давление и скорость. Коэффициенты определяются индивидуально для каждого пациента на основе клинических данных методами теории обратных задач [2].

Как правило, уравнения, построенные по клиническим данным, обладают устойчивым периодическим решением. Удобным инструментом для исследования решений уравнений с гармонической правой частью являются диаграммы Найквиста (ДН) [3]. ДН связывают параметры внешней силы и параметры возбуждаемых в системе колебаний. Такой подход существенно дополняет экспериментальные данные.

В общей сложности были проанализированы ДН для 300 уравнений. Обнаружено конечное число паттернов, представляющих динамику изменения решения уравнения при изменении правой части, начиная с появления субгармоник в решении и заканчивая разрушением периодического решения.

Проводится аналитическое исследование бифуркаций решения. Выявлены значения параметров, для которых происходит качественная перестройка решений и возникают высокочастотные осцилляции. Результаты аналитических исследований согласуются с численным исследованием бифуркаций. Проводится сравнение результатов численных расчетов с результатами аналитических исследований уравнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00036).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутенин Н. В., Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. Л. *Введение в теорию нелинейных колебаний*. М.: Наука, 1987.
2. Чупахин А. П., Черевко А. А., Хе А. К., Кривошапкин А. Л., Орлов К. Ю., Баранов В. И., Телегина Н. Ю., Панарин В. А. *Измерения и анализ локальной церебральной гемодинамики у больных с сосудистыми мальформациями головного мозга*. Патология кровообращения и кардиохирургия. 2012. Т. 16. № 44. С. 27–31.
3. Nyquist H. *Regeneration theory*. Bell System Technical Journal. 1932. V. 11. № 1. Pp. 126–147.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ТРУБОПРОВОДЕ С ЗАТВОРОМ

Е. И. Борзенко, К. Е. Рыльцева, О. Ю. Фролов, Г. Р. Шрагер

Томский государственный университет

Ламинарные течения жидкости в трубах с различными конструктивными элементами являются актуальной темой исследования в связи с многочисленными техническими приложениями, связанными с транспортом жидких сред. Для определения напорно-расходных характеристик трубопроводов необходимо оценивать гидравлические сопротивления составляющих элементов [1]. В проведенном исследовании рассматривается ламинарное, изотермическое, стационарное течение неньютоновской жидкости в каналах с различными конструктивными элементами: сужение/расширение, шаровой затвор. Задача формулируется с использованием переменных функция тока – вихрь. Реологическое поведение среды описывается уравнением Оствальда–де Виля. На твердых стенках выполняются условия прилипания, на входной границе распределение скорости соответствует установившемуся течению в бесконечной трубе с заданным постоянным расходом, на выходной границе используются мягкие граничные условия для продольной скорости и равенство нулю нормальной скорости. На оси симметрии выполняются условия симметрии.

Для получения стационарного решения задачи используется метод установления [2], который подразумевает добавление производных искомым функций по времени в основные уравнения с последующим применением конечно-разностного алгоритма на основе схемы продольно-поперечной прогонки [3]. В результате параметрических исследований развитого потока степенной жидкости в канале с различными конструктивными элементами получены распределения динамических и кинематических характеристик течения в зависимости от значений числа Рейнольдса, показателя нелинейности и размеров канала. Кроме того, определены зависимости местных гидравлических сопротивлений в области умеренных значений числа Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-03935а) и гранта Президента РФ (МК- 710.2017.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fester V., Slatter P., Alderman N. *Resistance Coefficients for Non-Newtonian Flows in Pipe Fittings*. Rheology. InTech. 2012. Pp.151–186.
2. Годунов С. К., Рябенский В. С. *Разностные схемы*. М.: Наука, 1977.
3. Яненко Н. Н. *Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики*. Новосибирск.: Наука, Сибирское отделение, 1967.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ СКОЛЬЖЕНИЕ-ПРИЛИПАНИЕ НА ТВЕРДОЙ СТЕНКЕ В СЛУЧАЕ ТЕЧЕНИЯ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ В Т - ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

Е. И. Борзенко, О. А. Дьякова

Томский государственный университет

Исследуется плоское установившееся течение неньютоновской несжимаемой жидкости в Т-образном канале. На твердой стенке рассматриваются два вида граничных условий: условие прилипания и условие проскальзывания по закону Навье. Движение жидкости обеспечивается заданием однородных профилей давления в граничных сечениях входа/выхода канала. Математическая постановка включает в себя уравнения движения и неразрывности, записанные в безразмерных переменных. Эффективная вязкость определяется в соответствии с законом Освальда – де Вилля. Поставленная задача решается численно методом контрольного объема с использованием процедуры SIMPLE [1]. Численные расчеты показывают, что для рассматриваемых моделей взаимодействия жидкости с твердой стенкой формируется установившийся режим течения. В окрестностях границ входа/выхода реализуется плоскопараллельное течение с параболическим профилем скорости и однородным распределением давления в сечениях, перпендикулярных направлению движения. В окрестности сечений, содержащих угловые точки, формируются переходные участки течения, которые характеризуются наличием циркуляционных зон. В ходе проведенных параметрических исследований в зависимости от числа Рейнольдса, реологии среды и вида граничного условия на твердой стенке выявлены характерные режимы течений, отличительной чертой которых является перераспределение потока и изменение направления течения жидкости при заданных значениях давления в граничных сечениях. Выполнена оценка степени влияния основных параметров на картину течения. Построены критериальные зависимости, описывающие расходно-напорные характеристики течения в условиях постановки настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-02256 а) и Гранта Президента РФ (МК-710.2017.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. М.: Энергоатомиздат, 1984.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ОДНОМЕРНОЙ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ

С. П. Борисов, А. Н. Кудрявцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
Лаборатория неравновесных течений, Новосибирский государственный
университет

Моделируется развитие одномерной неустойчивости детонационной волны для модели с одной химической реакцией аррениусовского типа. Для моделирования используется высокоточный численный метод, основанный на аппроксимации пространственных производных компактными разностями 6-го порядка и интегрировании уравнений по времени с помощью 6-стадийной, сохраняющей сильную устойчивость (SSP, Strong Stability Preserving) схемы Рунге-Кутты 5-го порядка. Передний фронт детонационной волны выделяется, и, для определения его движения, совместно с уравнениями газовой динамики интегрируется выведенное из характеристических соотношений уравнение для ускорения ударной волны.

Выполнено прямое сравнение результатов расчетов при малых амплитудах возмущений с предсказаниями линейной теории, выявившее полное согласие расчетных данных с теоретическими предсказаниями. Изучена эволюция возмущений на более поздних нелинейных стадиях. Показано, что в зависимости от параметров задачи, таких как степень пересжатия f и безразмерные тепловыделение Q и энергия активации E_a , возможны различные сценарии развития течения. Нелинейное насыщение роста возмущений может приводить к формированию устойчивого периодического предельного цикла, сопровождаться несколькими бифуркациями удвоения периода, что ведет к появлению нескольких минимумов и максимумов за полный период колебаний и, наконец, заканчиваться переходом к хаотическому режиму. На рисунке в качестве примера показано формирование устойчивого предельного цикла.

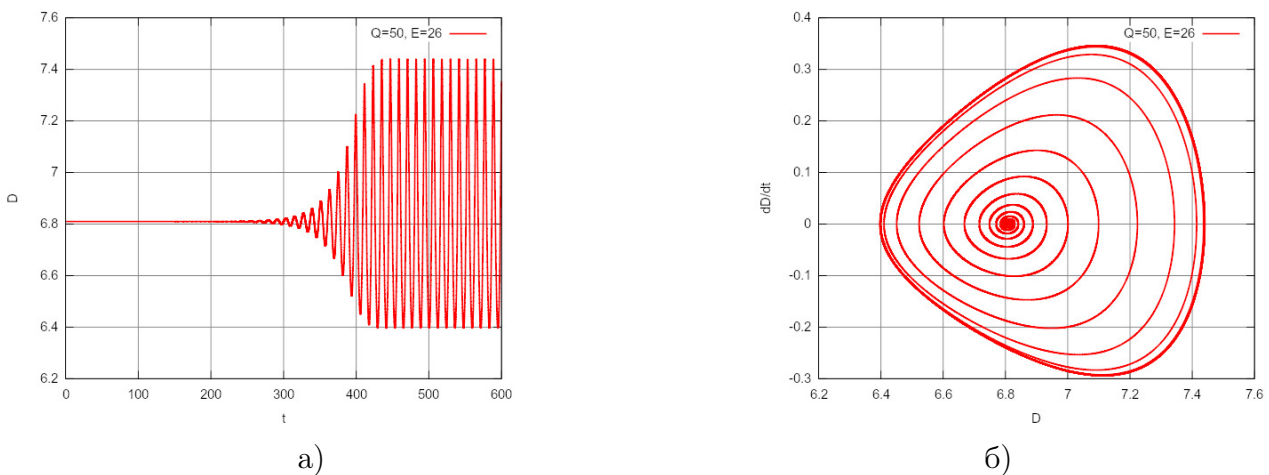


Рис. Зависимость скорости детонационной волны от времени $D(t)$ (а) и фазовый портрет системы в плоскости $(D, dD/dt)$ (б) при $f = 1$, $Q = 50$, $E_a = 26$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-57-48007).

ВЫТЕСНЕНИЕ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА

С. А. Боронин¹, А. А. Осипцов¹, Ж. Дерош²

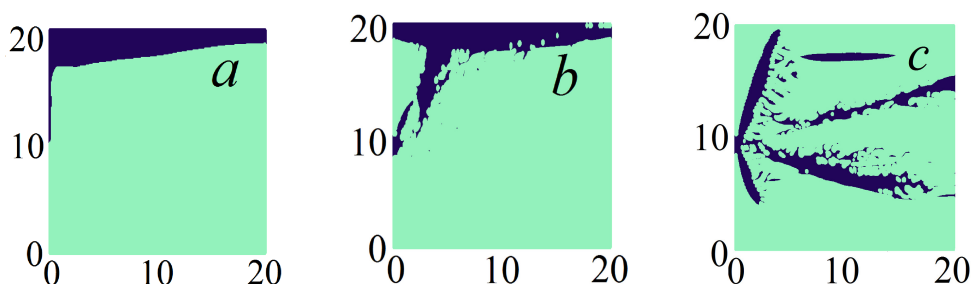
¹Сколковский институт науки и технологий, Москва

²Services Petroliers Schlumberger, Paris La Défense Cedex, France

Мы продолжаем исследование течений неньютоновских жидкостей в ячейке Хеле-Шоу, начатое в [1]. В приближении тонкого слоя получены двумерные осредненные по толщине узкого канала уравнения, описывающие течение несжимаемых вязкопластических жидкостей. Система уравнений состоит из гиперболического уравнения переноса жидкостей и нелинейного эллиптического уравнения, описывающего поле давления. Система уравнений решена численно при помощи метода конечных разностей на прямоугольной разнесенной сетке. Уравнения переноса решены явно при помощи TVD схемы второго порядка [2]. Квазилинейное уравнение для давления решено при помощи метода простой итерации и многосеточного метода [3]. Последовательная валидация модели путем сравнения с различными экспериментальными данными приведена в [1].

Проведены параметрические исследования вытеснения вязкопластических жидкостей в ячейке Хеле-Шоу, аппроксимирующей трещину гидроразрыва. В частности, изучена форма каверны, возникающей в окрестности перфорационных зон при вытеснении суспензии частиц пропантa чистой жидкостью в процессе завершающей стадии закачки в трещину гидроразрыва с целью очистки скважины (“overflush”). Получено, что в зависимости от параметров потока, возможны три режима течения: 1) с доминированием гравитационного оплывания (рис. *a*); 2) промежуточный (рис. *b*); 3) с доминированием пальцевидной неустойчивости (рис. *c*). Минимальная площадь каверны, требуемая для снижения риска закрытия трещины и потере ее связности со скважиной, достигается в случае, когда реализуется режим с выраженной пальцевидной неустойчивостью (рис. *c*), который достигается при увеличении контраста вязкостей жидкостей, предела текучести и скорости закачки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сколковского института науки и технологий.



ЛИТЕРАТУРА

1. Boronin S. A., Osiptsov A. A., Desroches J. *Displacement of yield-stress fluids in a fracture*. Intl. J. Multiphase Flow. 2015. V. 76. Pp. 47–63.
2. Leveque R. J. *High-Resolution conservative algorithms for advection in incompressible flow*. SIAM J. Numer. Anal. 1996. V. 33. №2. Pp. 627–665.
3. De Zeeuw, P. M. *Matrix-dependent prolongation and restrictions in black-box multigrid solver*. J. Comput. Appl. Math. 1990. V. 33. Pp. 1–27.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ МГД

Р. В. Бризицкий^{1,2}

¹Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

В ограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ с границей $\partial\Omega$ состоящей из двух частей Σ_ν и Σ_τ рассматривается краевая задача для стационарных уравнений магнитной гидродинамики вязкой жидкости

$$-\nu\Delta\mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \nabla p - \varkappa \operatorname{rot} \mathbf{H} \times \mathbf{H} = \mathbf{f}, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \text{ в } \Omega, \quad (1)$$

$$\nu_1 \operatorname{rot} \mathbf{H} - \rho_0^{-1} \mathbf{E} + \varkappa \mathbf{H} \times \mathbf{u} = \nu_1 \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = \mathbf{0} \text{ в } \Omega, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}|_{\partial\Omega} = \mathbf{g}, \quad \mathbf{H} \cdot \mathbf{n}|_{\Sigma_\tau} = q, \quad \mathbf{H} \times \mathbf{n}|_{\Sigma_\nu} = \mathbf{q}, \quad \mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\Sigma_\tau} = \mathbf{k}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{u} — вектор скорости, \mathbf{H} и \mathbf{E} — напряженность магнитного и электрического полей, соответственно, $p = P/\rho_0$, где P — давление, $\rho_0 = \operatorname{const}$ — плотность жидкости, $\varkappa = \mu/\rho_0$, $\nu_1 = 1/\rho_0\sigma = \varkappa\nu_m$, ν и ν_m — постоянные коэффициенты кинематической и магнитной вязкости, σ — постоянная проводимость, μ — постоянная магнитная проницаемость, \mathbf{n} — вектор единичной внешней нормали к $\partial\Omega$, \mathbf{j} — плотность внешних токов.

Глобальная разрешимость задачи (1)–(3) при однородных условиях для электромагнитного поля доказана в [1], при неоднородных в [2].

В настоящей работе для задачи (1)–(3) исследуются задачи управления, роль управления в которых играют граничные функции q и \mathbf{q} . Разрешимость задач управления доказана в случае, когда $q \in L^2(\Sigma_\tau)$ и $\mathbf{q} \in L^2(\Sigma_\nu)^3$ для функционалов качества общего вида.

Также при минимальных требованиях на граничные функции была получена система оптимальности, с помощью которой исследована устойчивость решений экстремальных задач относительно возмущений как функционалов качества, так и заданных функций задачи (1)–(3). Интерес к минимальным требованиям к граничным управлениям связан с обязательным наличием этих функций в функционалах качества как регуляризаторов при исследовании устойчивости решений задач управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00365-а) и Российского научного фонда (код проекта 14-11-00079).

ЛИТЕРАТУРА

1. Alekseev G., Brizitskii R. *Solvability of the boundary value problem for stationary magnetohydrodynamic equations under mixed boundary conditions for the magnetic field*. Applied Mathematics Letters. 2014. V. 32. Pp. 13–18.
2. Алексеев Г. В. *Смешанные краевые задачи для стационарных уравнений магнитной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости*. ЖВМ. 2016. Т. 56. № 8. С. 1441–1454.

ОБРАТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ МАССОПЕРЕНОСА

Р. В. Бризицкий^{1,2}, Ж. Ю. Сарицкая²

¹Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

В ограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ с границей Γ рассматривается краевая задача

$$-\operatorname{div}(\lambda \nabla \varphi) + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi + k\varphi = f \text{ в } \Omega, \quad \varphi = \psi \text{ на } \Gamma_D, \quad (1)$$

Здесь φ — концентрация вещества, \mathbf{u} — заданный вектор скорости, f — объемная плотность внешних источников (загрязняющего) вещества, $\lambda = \lambda(\mathbf{x})$ — коэффициент диффузии, $k = k(\varphi, \mathbf{x})$ — коэффициент реакции.

Глобальная разрешимость задачи (1) вытекает из результатов [1,2] в случае, когда коэффициент реакции k достаточно произвольно зависит как от концентрации φ , так и от $\mathbf{x} \in \Omega$. Обратная коэффициентная задача заключается в восстановлении коэффициента диффузии λ и скорости \mathbf{u} по дополнительной информации о решении задачи (1). Указанная задача сведена к задаче мультипликативного управления, разрешимость которой доказана при достаточно общих функционалах качества. При конкретных функционалах качества и коэффициентах реакции исследована устойчивость решения задачи управления.

Рассмотрены частные случаи коэффициента реакции $k_1 = \beta_1(\mathbf{x})\varphi^2|\varphi|$ и $k_2 = \beta_2(\mathbf{x})\varphi^4$, при которых функции β_1 и β_2 так же относятся к неизвестным коэффициентам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00103-а) и Российского научного фонда (код проекта 14-11-00079).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г. В., Бризицкий Р. В., Сарицкая Ж. Ю. *Оценки устойчивости решений экстремальных задач для нелинейного уравнения конвекции–диффузии–реакции*. Сиб. ЖИМ. 2016. Т. 19. № 2. С. 3–16.
2. Бризицкий Р. В., Сарицкая Ж. Ю. *Оценки устойчивости решений экстремальных задач для нелинейного уравнения конвекции–диффузии–реакции*. ЖВМ. 2016. Т. 56. № 12. С. 60–71.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ И УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

*И. Г. Бродова¹, О. Б. Наймарк², А. Н. Петрова¹, О. А. Плехов²,
С. В. Разоренов^{3,4}, Е. В. Шорохов⁵*

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет

⁵Российский федеральный ядерный центр-ВНИИ технической физики им. Е. И. Забабахина, Снежинск

Объектом исследования являются ультрамелкозернистые (УМЗ) алюминиевые сплавы – АМц, В95, А5083 и технически чистый алюминий А7, полученный методом динамического канального — углового прессования (ДКУП). Механические свойства сплавов изучались при динамическом сжатии в разрезном стержне Гопкинсона-Кольского и при ударно-волновом нагружении образцов. Показано, что при ДКУП, в зависимости от условий нагружения, в исследованных материалах формируются различные по своей дефектности структуры со средним размером зерна от 200 нм до 600 нм. Их образование происходит в результате фрагментации структуры и динамической рекристаллизации. Материалы приобретают высокие прочностные характеристики. По сравнению со своими крупнокристаллическими (КК) аналогами, твердость повысилась в 1,5 – 2 раза. По результатам инфракрасного сканирования образцов при динамическом сжатии УМЗ сплавов АМц и В95 определено влияние размерности и степени дефектности структуры на величину энергии диссипации. Отмечено, что при скорости деформации $6 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ доля диссипированной энергии в УМЗ сплаве В95 в 1,8 раза выше, чем в КК сплаве. Кроме того, установлена обратная скоростная зависимость динамического предела текучести, (понижением его на 30%) с ростом скорости деформации от $4 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ до $6 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Во взрывных экспериментах с использованием лазерного измерителя скорости VISAR определены динамические пределы текучести и величины откольного разрушения исследованных КК и УМЗ сплавов. При субмикросекундном ударном сжатии сплавов до 4-5 ГПа выявлена корреляция между масштабом структурных элементов и величиной сопротивления деформированию и разрушению. Показано, что динамические пределы текучести в УМЗ сплавах, в среднем, в 1,5 раза выше, чем в КК сплавах, а их откольная прочность при скорости деформации $(1,2-3) \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ равна 1,32-1,36 ГПа. Для КК и УМЗ структур сплава А5083 она составляет 1,5 ГПа. По результатам анализа механических свойств ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов при скоростях деформации $10^{-3} - 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ сделано заключение о существовании структурной чувствительности механических свойств УМЗ алюминиевых сплавов, сформированных при интенсивной пластической деформации методом ДКУП.

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИТНОЙ БРОНЕВОЙ ЗАЩИТЕ ПРИ УДАРЕ

О. Н. Будадин¹, В. О. Каледин², С. О. Козельская¹, А. Е. Гилева²

¹АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», Хотьково, Московская область

²Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета

Рассматриваются механические и термомеханические процессы взаимодействия поражающего элемента с многослойной преградой из полимерной ткани [1]. Предложена математическая модель, описывающая торможение поражающего элемента вследствие рассеяния энергии, затрачиваемой на необратимые деформации растяжения нитей ткани, трение при взаимном проскальзывании нитей и нагрев материала преграды. Тканый материал слоя при моделировании заменяется сплошным слоем, имеющим осредненные физико-механические и теплофизические характеристики. Эти характеристики могут быть определены параметрической идентификацией по данным физических экспериментов.

Вследствие взаимодействия броневой преграды с поражающим элементом наблюдается динамическое изменение параметров состояния слоистого материала на каждом временном шаге в процессе торможения ударяющего тела: перемещения, скорости, внутренние напряжения и температура. Эти динамически изменяющиеся характеристики зависят от кинетической энергии ударного элемента, а также от материала и структуры броневой преграды. Температура поверхности тканого образца может быть измерена тепловизионной аппаратурой, что создает возможность диагностики материалов броневых преград на основе измерения динамических температурных полей, но требует наличия достаточно адекватной и в то же время экономичной расчетной модели [2].

Математическая модель описывает следующие процессы, протекающие при взаимодействии ударника с преградой: возникновение растягивающих напряжений в нитях, накопление необратимых деформаций, переход необратимо рассеянной энергии в тепло, геометрически и физически нелинейную деформацию и взаимное смещение слоев ткани, а также взаимное проскальзывание нитей внутри слоя. Движение моделируемого объекта однозначно описывается переносными перемещениями слоев, относительными перемещениями нитей основы и перемещениями нитей утка. Определяющие уравнения включают нелинейно-упругую и вязкую составляющие напряжений, которые зависят от текущей деформации и ее скорости, а также от накопленной необратимой деформации и взаимного смещения нитей.

Разрешающие уравнения движения решаются численным интегрированием с использованием абсолютно устойчивой неявной разностной схемы по времени. На каждом временном шаге рассчитывается температура тканой преграды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко Е. Ф., Ермоленко А. Ф. *Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Т. 1. Механизмы взаимодействия с баллистическими поражающими элементами*. Москва: ОАО «ЦНИИСМ». 2013.
2. Будадин О. Н., Каледин В. О., Кульков А. А., Пичугин А. Н., Нагайцева Н. В. *Диагностика качества конструкций из композитных материалов в процессе их силового нагружения*

по анализу динамических температурных полей. Контроль. Диагностика. 2014. № 7. С. 54–58.

НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ВОЗДУХА И КЕРОСИНА, БАРБОТИРОВАННОГО ВОДОРОДОМ

Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников

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

Ранее авторами в кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм (ДК-500) были получены режимы непрерывной спиновой детонации (НСД) в топливно-воздушной смеси (ТВС) синтез-газ – воздух [1]. В докладе представлены результаты по реализации режимов НСД двухфазной смеси авиационный керосин – воздух с добавкой водорода.

Эксперименты проведены в ДК-500 (кольцевая щель для подачи воздуха $\delta = 3.5$ мм, зазор между стенками камеры $\Delta = 18$ мм, длина $L_c = 490$ мм). Жидкий авиационный керосин (ТС - 1) перед подачей в камеру барботировался водородом. Расходы компонентов изменялись в диапазонах: воздуха – $G_a = 7.0 \div 14.8$ кг/с, водорода – $G_H = 0.06 \div 0.35$ кг/с, керосина – $G_f = 0.3 \div 1$ кг/с, а удельные расходы смеси через камеру – $g_\Sigma = 230 \div 565$ кг/(с·м²). При этом массовая доля H_2 в двухфазном горючем $m_H = G_H/(G_f + G_H)$ изменялась в пределах $m_H = 8.4 \div 42$ %.

Результаты экспериментов. Впервые в гетерогенной смеси керосин/водород - воздух реализована НСД с числом поперечных детонационных волн (ПДВ) от пяти до одной. При $g_\Sigma = 527$ кг/(с·м²), $\phi_f = 0.32$, $\phi_H = 0.51$, $m_H = 42$ % реализован пятиволновой ($n = 5$) режим НСД с частотой ПДВ $f = 4.86$ кГц, скоростью детонации $D = 1.48$ км/с и высотой фронта ПДВ около $h = 60 \div 70$ мм. При $g_\Sigma = 557$ кг/(с·м²), $\phi_f = 0.68$, $\phi_H = 0.41$, $m_H = 21$ % реализован трехволновой режим НСД с $f = 2.93$ кГц, $D = 1.49$ км/с и $h = 100 \div 120$ мм. При $g_\Sigma = 362$ кг/(с·м²), $\phi_f = 1.29$, $\phi_H = 0.27$, $m_H = 8,4$ % - одноволновой режим НСД с $f = 1.02$ кГц и $D = 1.56$ км/с. Установлено, что количество ПДВ и частота их вращения уменьшаются, а высота поперечного детонационного фронта растет при уменьшении m_H в двухфазном горючем и удельного расхода воздуха.

Таким образом, в проточной камере ДК-500 впервые реализованы многоволновые режимы НСД гетерогенной смеси жидкого авиационного керосина и воздуха с добавкой газообразного водорода. Применение барботирования жидкого керосина водородом позволило уменьшить массовую долю водорода в двухфазном горючем до 8.4 %. Структура ПДВ в исследованной гетерогенной ТВС подобна наблюдавшимся в смеси синтез-газ-воздух [1]. Полученные экспериментальные результаты открывают возможность систематических и целенаправленных исследований режимов НСД в гетерогенных ТВС применительно к кольцевым камерам сгорания детонационных воздушно-реактивных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф., Самсонов А. Н. *Влияние геометрии камеры на реализацию непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ - воздух*. ФГВ. 2015. Т. 51, № 6. С. 72–84.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ БАССЕ НА ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ В СТОЯЧЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ В ЖИДКОСТИ

В. В. Вановский^{1,2}, А. Г. Петров²

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный

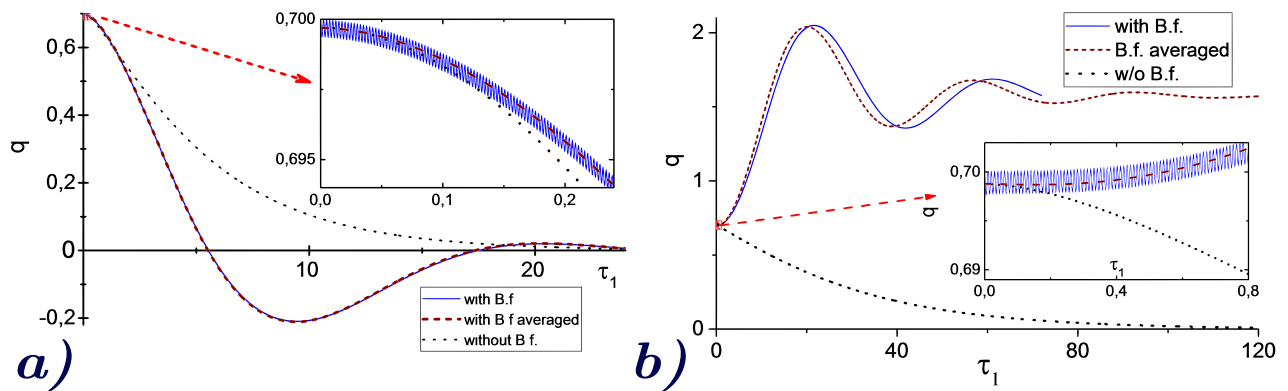
²Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

Уравнение Бассе-Буссинеска-Озеена описывает движение малой сферической частицы в нестационарном потоке жидкости $v(x, t)$ при малых числах Рейнольдса. Мы используем выражения для инерциальной силы в форме, предложенной [1]. Сила Бассе написана в форме, предложенной [2]:

$$F_{\text{Basset}} = -6\pi\mu a t_\mu^{1/2} \left(\frac{d}{dt}\right)^{1/2} (\dot{x} - v), \quad t_\mu = \frac{\rho a^2}{\mu},$$

$$\left(\frac{d}{dt}\right)^{1/2} (\dot{x} - v) = \int_{t'=0}^t \left(\frac{d^2x}{dt'^2} - \frac{\partial v}{\partial t'} - \frac{dx}{dt'} \frac{\partial v}{\partial x}\right) \frac{dt'}{\sqrt{\pi(t-t')}} + \frac{\dot{x}(0) - v(0)}{\sqrt{\pi t}}.$$

Здесь ρ обозначает плотность жидкости, a — радиус частицы, μ — вязкость жидкости, которую мы считаем не зависящей от плотности, x — координату частицы. Сила Бассе сильно усложняет численное моделирование уравнений движения частицы из-за сингулярного ядра и квадратичного времени вычисления по количеству шагов.



Интегродифференциальные уравнения динамики частицы были решены численно с помощью разработанного метода третьего порядка точности, а также осреднены с помощью методики Крылова-Боголюбова. Приведенное сравнение точного численного и асимптотического решений, а также решения без учета силы Бассе показаны на рисунке в безразмерных координатах и времени. Видим, что для легкой частицы (b) учет силы Бассе изменяет положение ее фокусировки в стоячей волне. Данный результат имеет большое прикладное значение в акустофорезе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01633).

ЛИТЕРАТУРА

1. Maxey, M. R., Riley, J. J. *Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow*. Physics of Fluids. 1983. V. 26(4). Pp. 883–889.

2. Michaelides, E. E. *A novel way of computing the Basset term in unsteady multiphase flow computations*. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1992. V. 4(7), Pp. 1579–1582.

ЗАДАЧИ МНОГОФРОНТОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

А. А. Васильев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Эффект возбуждения в горючей смеси процессов горения или детонации обычно носит “пороговый” характер (“да” - “нет”) для любого инициатора. В идеализированной модели сильного взрыва для инертной среды определяющим параметром, от которого зависит распространение взрывной волны, является энергия взрыва. По аналогии, и для горючей смеси минимальную энергию инициатора, обеспечивающую 100-процентное возбуждение режима горения или детонации, общепринято называть критической энергией. Критическая энергия зажигания (ignition) $E_{ignition}$ (во всяком случае, при искровом воспламенении) традиционно выступает как основной параметр пожароопасности смеси. Критическая энергия инициирования детонации E^* идеального с точки зрения пространственно-временных характеристик инициатора служит мерой детонационной опасности смесей: чем меньше E^* , тем более опасна смесь.

Формулировка условия инициирования на основе единственного параметра - критической энергии - очень привлекательна. Однако, многофронтная структура реальной детонационной волны (вместо ее идеализированной одномерной модели с гладким фронтом) не позволяет считать проблему инициирования решенной: слабо изученным до сих пор является вопрос об эффективном энерговыделении в многофронтной детонации. Эту проблему можно решить путем сравнения эффективной энергии источника инициирования при возбуждении взрывной волны в инертной смеси и суммарной энергии источника и горючей смеси при критическом режиме инициирования детонации. Эти данные можно получить при обработке траекторий волн с точки зрения модели сильного взрыва. Из этих данных затем и определяется энергия смеси, идущая на поддержку многофронтной детонации.

Обнаружение бифуркационных структур в ряде многотопливных систем, когда в системе одновременно фиксируются ячейки разных размеров, приводит к необходимости проверки различных критериев, установленных для классической моноразмерной структуры детонации, и внесения корректив во все установленные закономерности, характерные для одномасштабных структур. Прежде всего, это касается инициирования детонации: какая ячейка - крупная или мелкая - определяет критическую энергию инициирования в смесях с двухмасштабной ячеистой структурой? Часть результатов выходит за рамки классических представлений.

Очень интересным для будущих исследований является вопрос о существовании ячеистых структур в гетерогенной ДВ (например, ДВ с конденсацией углерода в продуктах). Как происходит конденсация и коагуляция атомов углерода в различные экзотические структуры типа нанотрубок, фуллеренов, кластеров и т.д.? В докладе обсуждаются и другие задачи многофронтной детонации. . .

Работа выполнялась в соответствии с Программой фундаментальных исследований государственных академий наук на 2017-2020 гг..

САМОВОЗБУЖДАЮЩИЕСЯ КОЛЕБАНИЯ УПРУГОЙ ТРУБКИ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ВНУТРИ НЕЕ ЖИДКОСТИ НА ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕЖИМАХ

В. В. Веденеев¹, Ю. С. Зайко²

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

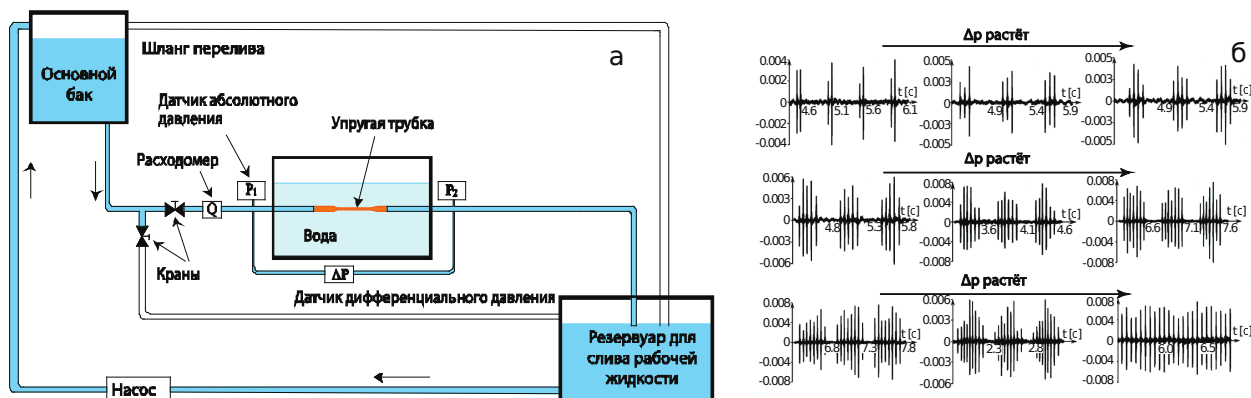
²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Поведение упругих трубок при протекании внутри них жидкости изучается на протяжении нескольких десятилетий экспериментально, аналитически и численно в контексте моделирования течений различных биожидкостей [1, 2]. Большинство экспериментальных работ выполнено в широком диапазоне чисел Рейнольдса и чаще всего на турбулентных режимах, однако, известно, что многие биожидкости циркулируют на ламинарных режимах.

В данной работе экспериментально исследуется влияние режима течения (ламинарный или турбулентный) внутри упругой трубки на ее устойчивость и характер колебаний. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке (а). В качестве рабочих жидкостей используются растворы глицерина в воде различной вязкости, что обеспечивает ламинарный или турбулентный режим в диапазоне расходов 1...9 л/мин в тонкостенной латексной трубке диаметром 8 мм.

Получены границы устойчивости трубки в зависимости от перепада давления в ней при фиксированных значениях расходов из указанного диапазона. Показано, что режим течения мало влияет на положение границы устойчивости. Характер предельного цикла колебаний после потери устойчивости при постепенном повышении перепада давления в трубке показан на рисунке (б).

Первым из основных отличий в поведении трубки на различных режимах является более ярко выраженная при ламинарном течении зависимость частоты колебаний от перепада давления в трубке после установления одночастотных колебаний. Вторым — более высокая амплитуда колебаний на турбулентных режимах при прочих одинаковых параметрах. Результаты экспериментов подтверждены численными расчетами.



ЛИТЕРАТУРА

1. Grotberg J. B., Jensen O. E. *Biofluid mechanics in flexible tubes*. Annu. Rev. Fluid Mech. 2004. V. 36. Pp. 121–147.

2. Pedley T. J., Brook B. C., Seymour R. S. *Blood pressure and flow rate in the giraffe jugular vein*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1996. V. 351. Pp. 855–866.

СТАЦИОНАРНАЯ ПЛОСКАЯ КОНВЕКЦИЯ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ НА НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦАХ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

С. С. Власова¹, Е. Ю. Просвиряков²

¹АО “Казанское ОКБ “Союз”, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

Рассматривается двумерная задача конвективного течения сильновязкой несжимаемой жидкости в бесконечном слое. Конвекция в бесконечном слое жидкости индуцируется квадратичным законом распределения температуры на нижней и/или верхней границе. Соответственно на верхней или нижней границе учитываются фазовые превращения, которые описываются законом Ньютона-Рихмана. Давление является квадратичной функцией, скорости линейно зависят от части координат. Точные решения получены с помощью линеаризации исходной системы Обербека-Буссинеска с использованием рассматриваемого класса [1]. Полученные решения справедливы при определенных значениях числа Грасгофа: $Gr \ll \frac{1}{\delta^2}$.

Здесь $\delta = \frac{h}{l}$, h — толщина слоя, l — характерный масштаб течения по горизонтальным координатам. Линеаризация возможна при очень больших значениях числа Грасгофа, если для показателя геометрической анизотропии справедлива оценка $\delta \ll 1$, которая имеет место для крупномасштабных течений. Таким образом, данные решения справедливы в тонком слое не только для ламинарных течений, но и для турбулентных.

Анализ функции тока и завихренности показал, что в рассматриваемом слое наблюдаются противотечения и разное число вихрей, зависящие от значений чисел подобия и краевых условий. Изучая топологию изолиний температуры и давления было показано, что изолинии температуры при любых граничных условиях и числах подобия не являются замкнутыми, линии уровня давления, при определенных числах подобия могут принимать замкнутый (локально эллиптический вид), выведен критерий выполнения данного условия [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.1577.2017/ПЧ на выполнение проекта по теме “Численное и физическое моделирование аэродинамических и аэроакустических характеристик винтокрылых несущих систем перспективных летательных аппаратов”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристов С. Н., Просвиряков Е. Ю. *Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии* ТОХТ. 2016. № 3. С. 294–301.
2. Власова С. С., Просвиряков Е. Ю. *Конвективное движение охлаждаемой снизу жидкости по параболическому закону при учете теплообмена на свободной границе*. Известия высш. учебн. завед. Авиац. техн. 2016. № 4. С. 82–87.

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОТКРЫТЫХ ВОДОТОКОВ И ВОДОЕМОВ

А. Ф. Воеводин, В. С. Никифоровская

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

В работе рассматривается численное моделирование гидрологических (термических, водно-солевых) процессов, формирующихся в системах открытых водотоков и водоемов под влиянием природных факторов и различных водохозяйственных мероприятий. Оно выполняется с помощью разработанных в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН одномерных, двумерных (продольно-вертикальных) математических моделей и их комбинаций. Приводятся результаты расчетов (вторжение соленых вод в пресные речные воды Обско-Тазовской устьевой области, формирование термически-стратифицированных течений (полуторагодичный цикл) в непроточном водоеме и др.).

Анализ результатов расчетов показал

а) экономичность и эффективность использования разработанных математических моделей для исследования гидрологических процессов;

б) изучение физических процессов, происходящих в сложных водных объектах, имеющих в своем составе сильно разные по масштабам составляющие, с помощью какой-либо одной (по размерности) избранной математической модели не экономично и не эффективно с точки зрения затрат машинного времени.

Опыт решения подобных задач с помощью разработанного в Институте гидродинамики комплекса программ на ЭВМ, показал [1–3]:

1. эффективность разработанных в Институте одномерных и двумерных математических моделей, экономичность численных методов, и, следовательно, полезность их использования при решении широкого круга задач прикладной гидродинамики;

2. стыковка одномерной и двумерной (продольно-вертикальной) задачи имеет преимущество перед трехмерными моделями, т.е. эффективность и оперативность моделей 1D и 2D, проявляется в случаях, когда в водных объектах, представляющих собой системы реальных русел и водоемов большой протяженности, необходимо учесть специфику морфометрии, работу гидротехнических сооружений, местные сопротивления, боковые притоки воды (сосредоточенные, распределенные по длине русел водотоков).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воеводин А. Ф., Шугрин С. М. *Методы решения одномерных эволюционных систем*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1993.
2. Воеводин А. Ф., Никифоровская В. С. *Комплексная математическая модель для исследования волновых процессов в проточных системах открытых русел и водоемов*. Метеорология и гидрология. 2012. № 4, С. 64–74.
3. *Комплекс гидравлических моделей для решения проблем рационального использования водных ресурсов*. Рекламный проспект. Внешторгиздат, 1989. Изд. № 6120 МВ.

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК

Ю. М. Волчков

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

Излагаются методы сведения трехмерной задачи теории упругости к двумерной — теории пластин и оболочек. Рассматривается два подхода: использование кинематических и силовых гипотез и разложение решений трехмерной теории упругости по полной системе функций. В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН развит метод построения теории оболочек и пластин, основанный на использовании нескольких аппроксимаций каждой искомой функции (напряжений и смещений) конечными отрезками рядов полиномов Лежандра [1]. Построены уравнения теории оболочек порядка N в ортогональной криволинейной системе координат. В любом приближении порядок построенной системы дифференциальных уравнений не зависит от того, задаются ли на лицевых поверхностях оболочки напряжения, смещения или их линейная комбинация, что обеспечивает корректную формулировку контактных условий на этих поверхностях как в перемещениях, так и в напряжениях.

Результаты численных решений задач о напряженно-деформированном состоянии анизотропных слоистых пластин сопоставляются с аналитическими решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аннин Б. Д., Волчков Ю. М. *Неклассические модели теории пластин и оболочек*. ПМТФ. 2016. Т. 57. № 5. С. 5–14.

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИМЕРОВ

М. С. Воронин

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

Приводится метод расчета параметров функции времени релаксации касательных напряжений, являющейся одним из замыкающих соотношений для модели вязкоупругого тела максвелловского типа [1]. Метод основан на упрощении системы уравнений, описывающей деформирование тонкого стержня в рамках модели

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \dot{\epsilon}l, \\ \frac{dh_1}{dt} = \dot{\epsilon} - \frac{2}{3} \frac{h_1 - h_2}{\tau}, \\ \frac{dS}{dt} = \frac{2}{3} \frac{E_D}{\tau E_S} (h_1 - h_2)^2, \\ \sigma_2 \equiv [E_{h_2}(h_1, h_2, h_3, S)]_{h_2=h_3} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время, l — длина стержня, $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации, $E = E(\delta, D, S)$ — уравнение состояния при нешаровом тензоре деформаций, δ , D — первый и второй инвариант тензора эффективной упругой деформации, h_i — компоненты этого тензора, S — энтропия, E_D , E_S , E_{h_2} — частные производные по соответствующей переменной, τ — время релаксации касательных напряжений (ВРКН).

Если рассматривать систему (1) в точке предела упругости σ_Y , то ей эквивалента:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = \frac{2}{3} \frac{h_1 - h_2}{\tau(\sigma_Y, T)}, & T = E_S(h_1, h_2, h_2, S_0), \\ \sigma_1(h_1, h_2, h_2, S_0) = \sigma_Y, \\ \sigma_2(h_1, h_2, h_2, S_0) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Определив h_1 и h_2 на всем множестве экспериментальных точек $\sigma_Y(\lg(\dot{\epsilon}), T_0)$, решая два нижних уравнения из (2) для напряжений, можно найти параметры ВРКН τ минимизируя отклонения расчетной и экспериментальной $\dot{\epsilon}_i$ скорости деформации:

$$\sum_i (\dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon}(\sigma_{Yi}, T_i))^2 \rightarrow 0.$$

Метод позволяет отыскивать те параметры ВРКН, которые ответственны за описание предела упругости материала в широком диапазоне температур и скоростей деформации. Результаты применения метода демонстрируются на примере трех полимерных материалов: ПММА, ПТФЭ и эпоксидной смолы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С. К., Роменский Е. И. *Элементы механики сплошных сред и законы сохранения*. Новосибирск: Научная книга, 1998.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСЖИМАЕМЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

Е. С. Вячкин¹, В. О. Каледин¹, Е. В. Решетникова¹, С. М. Аульченко²

¹Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета

²Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

В работе [1] была предложена однопараметрическая модель деформирования слоистых структур, содержащих объемно-несжимаемые слои. Для расчета полей деформаций и напряжений объектов, содержащих слабосжимаемые слои, предлагается рассматривать их как абсолютно несжимаемые (коэффициент Пуассона принимается равным 0,5), тем самым получена модель, зависящая от одного параметра — модуля сдвига. Задача сведена к вычислению предела решения регуляризованной системы линейных алгебраических уравнений и предела его производной по параметру регуляризации, и построен алгоритм, апробированный на кусочно-билинейных аппроксимациях искомым полей перемещений. Улучшение порядка

сеточной сходимости численного решения потребовало специального выбора аппроксимирующих функций.

При аппроксимации перемещений несжимаемого материала необходимо использовать бездивергентные базисные функции ($divU = 0$). В работе [2] предложено использовать преобразованное условие отсутствия дивергенции перемещений, позволяющее построить бездивергентный базис в цилиндрической системе координат и выяснить ранги матриц коэффициентов системы алгебраических уравнений. На основе полученных аппроксимирующих базисных функций разработана программа для расчета полей напряжений и деформаций.

Для исследования сходимости численного решения проведено сравнение с аналитическим решением тестовой задачи о толстостенной трубе под действием внутреннего давления, имеющей аналитическое решение [3].

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при использовании несжимаемых элементов решение устойчиво, при этом использование предложенного подхода позволяет получить погрешность вычисленных перемещений, напряжений и деформаций на любом виде сетки менее 0,5 %. Показано, что при использовании определяющих уравнений сжимаемого материала с коэффициентами Пуассона, близкими к 0,5, вычисленные значения перемещений на тех же сетках отличаются от теоретических на 3-26%, значения деформаций — на 1,5-15%, а напряжений — на 2-70%.

Таким образом, при использовании сжимаемого элемента с коэффициентом Пуассона, близким к 0,5, достижение приемлемой точности численного решения требует существенно меньших размеров элементов. При этом заранее неизвестно, насколько надо сгущать сетку. Предложенный подход позволяет использовать относительно крупные сетки, не требующие высокой вычислительной мощности компьютеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вячкин Е. С., Решетникова Е. В., Аульченко С. М., Рябков А. П., Вячкина Е. А. *Однопараметрическая модель деформирования слоистых структур, содержащих объемно-несжимаемые слои*. Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 6. С. 120–123.
2. Вячкин Е. С., Каледин В. О., Аульченко С. М., Бондаренко А. С., Вячкина Е. А. *численное решение задачи о деформировании слоистой структуры с объемно-несжимаемыми слоями*. Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 6. С. 117–119.
3. Работнов Ю. Н. *Механика деформируемого твердого тела*. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит. 1988. 712 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. Вячкина, Е. С. Вячкин

Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета

Существует несколько методов расчета распространения пожара в закрытом помещении, однако ни один из них не учитывает химического состава строительных и отделочных материалов. Для моделирования процесса горения строительных объектов с учетом химического состава конструкционных материалов предлагается на начальном этапе воспользоваться зональным методом как основой, так как он более прост для расчета. Основные параметры пожара рассчитаем как показано в работе [1].

Для проведения анализа процессов горения строительных и отделочных материалов необходимо провести оценку химического состава строительных материалов и их подверженность горению. Большинство строительных материалов либо вообще не подвержены горению, как цемент, стекло, глина, кирпич, либо при горении может стекловаться - кварцевый песок. Выпишем уравнения реакций горения отделочных материалов [1].

Анализ реакций горения отделочных материалов позволяет выделить основные продукты: угарный газ, углекислый газ, хлористый водород, цианистый водород, стирол, этиленбензол, толуол, бензол.

Исходными данными для связанной физико-химической задачи являются: геометрические размеры помещения, материалы внутренней отделки и стен, расположение окон и дверей, через которые возможен приток свежего воздуха. Основываясь на зональном методе, можно рассчитать среднюю температуру каждой зоны помещения в любой момент времени. Так же, можно будет рассчитать положение пламени в каждый момент времени и, как следствие, объемы выгоревших материалов.

В ходе расчета будет учитываться приток свежего воздуха, обеспечивающего зону очага возгорания достаточным для поддержания химической реакции уровнем кислорода. Количество кислорода, необходимого для поддержания процесса горения, составляет двадцать один процент от общего объема закрытого помещения.

В процессе реакции горения кислород будет активно расходоваться на процессы окисления и термического разложения. Интенсивность данных процессов влияет на количество токсичных веществ, выделяемых материалами. Чем больше кислорода доступно для процесса горения, тем больше реакций произойдет.

На основе полученных сведений о температуре и процентном содержании кислорода в воздухе, можно будет узнать, в какой момент времени, какие вещества начнут выделяться из отделочных и строительных материалов при окислении и выгорании и оценить их влияние на скорость распространения пожара.

Для более точного расчета физических параметров пожара в дальнейшем предлагается использовать полевой метод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каледин В. О., Вячкина Е. А. *Математическая модель процесса горения строительных объектов с учетом химического состава конструкционных и отделочных материалов.*

Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 138–143.

УЕДИНЕННЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Н. В. Гаврилов, В. Ю. Ляпидевский

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

Рассматривается распространение внутренних волн большой амплитуды над неровным дном. Одной из характерных черт волн большой амплитуды является наличие “захваченного ядра” в волне, то есть области, в которой скорость движения частиц близка, и даже превосходит, скорость волны. Эти волны широко распространены в океане и наблюдаются в виде приповерхностных волн понижения, придонных волн повышения и прослоечных волн. В работе представлены лабораторные эксперименты по генерации, взаимодействию и затуханию уединенных волн в двухслойной жидкости и иллюстрируются новые возможности применения аналитических и численных решений для интерпретации натуральных экспериментов. На основе математической модели трехслойной мелкой воды построены решения, описывающие эволюцию уединенных волн в шельфовой зоне. Проведенные лабораторные исследования уединенных волн большой амплитуды, распространяющихся в прослойке (симметричные и несимметричные уединенные волны второй моды), а также в приповерхностных и придонных слоях (волны понижения и повышения первой моды) показали возможность применения модели для расчета нестационарных волновых процессов, а также полученных из нее точных решений для определения формы и основных параметров этих волн. Анализ полученных решений дает возможность установить основные закономерности трансформации уединенных волн и нелинейных волновых пакетов большой амплитуды в шельфовой зоне моря.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ И ДИСПЕРСИОННЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ТЕОРИИ МЕЛКОЙ ВОДЫ В СЛОИСТЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ С МАССООБМЕНОМ

С. Л. Гаврилюк¹, В. Ю. Ляпидевский^{2,3}, А. А. Чесноков^{2,3}

¹Университет Экс-Марсель, Марсель

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Новосибирский государственный университет

Предложен метод построения математических моделей распространения нелинейных длинноволновых возмущений в пространственно-неоднородном течении стратифицированной жидкости на основе применения теории многослойной мелкой воды с учетом турбулентного перемешивания [1, 2]. С использованием данного подхода выведены и верифицированы новые

одномерные гиперболические и дисперсионные модели описывающие распространение и обрушение волн. Построение моделей основано на двухслойном представлении течения. Нижний слой жидкости считается потенциальным, однородным и описывается уравнениями Сен-Венана или Грина–Нагди (гиперболическая и дисперсионная модель, соответственно). Течение в вихревом верхнем слое моделируется осредненными уравнениями для толщины прослойки, средней скорости и турбулентной энергии. При наличии стратификации по плотности в верхнем слое, что связано с наличием проникающих в жидкость пузырьков при обрушении волн, добавляется еще одно уравнение для плотности. Между слоями предполагается наличие массообмена пропорционального величине характеризующей турбулентность верхнего слоя.

Предложенные уравнения движения использованы для моделирования волн Фавра. Установлено, что в рамках двухслойной дисперсионной модели однородной жидкости описывается переход от волнового бора к монотонному при увеличении числа Фруда набегающего потока. Выполнено сравнение с экспериментами Treske (1994), которые показали совпадение по амплитуде головной волны для различных чисел Фруда. С использованием этой же модели проведено сравнение эволюции профиля уединенной волны при выходе на пологий берег с известными экспериментальными данными Hsiao et al (2008). Уравнения движения обобщены на случай стратифицированного (пузырькового) верхнего слоя жидкости. Проведено численное моделирование формирования периодических структур из начального равномерного потока. Полученные результаты качественно совпадают с измерениями Nash & Moum (2005) амплитуды внутренних волн в шельфовой зоне океана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-11-20013).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляпидевский В. Ю., Чесноков А. А. *Слой смешения под свободной поверхностью*. ПМТФ. 2014. Т. 55. №2. С. 127–140.
2. Gavriluk S. L., Liapidevskii V. Yu., Chesnokov A. A. *Spilling breakers in shallow water: applications to Favre waves and to the shoaling and breaking of solitary waves*. J. Fluid. Mech. 2016. V. 808. P. 441–468.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ДИФФУЗИЯ ВИХРЕЙ

А. М. Гайфуллин, Д. А. Гаджиев, А. В. Зубцов

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,
Жуковский

Рассматриваются различные способы образования вихрей с их последующей диффузией: сход вихревой пелены с твердой поверхности, взаимодействие потока с подвижной поверхностью, взаимодействие слоев смешения.

В задаче о диффузии двух противоположно закрученных вихрей, которая эквивалентна задаче об эволюции следа за прямоугольным крылом, получено выражение для скорости перемещения центров вихрей, выведено интегральное соотношение, обобщающее при больших числах Рейнольдса теорему Прандтля–Бэтчелора на случай нестационарной рециркуляционной зоны, выявлены физические механизмы диссипации циркуляции вихрей, определены

автомодельные законы изменений характеристик вихрей на больших временах. Получено также численное решение задачи, которое подтвердило основные предположения предложенной теоретической модели.

Рассмотрены автомодельные решения уравнений Навье–Стокса, когда диффузионные и конвективные процессы изменяются одинаково по времени. В таких течениях циркуляция вихревых образований не должна меняться с течением времени. Исследуется вопрос о взаимодействии этих вихревых образований с постоянно генерируемой на твердой поверхности завихренностью. Производится сравнение автомодельного решения уравнений Навье–Стокса с соответствующим автомодельным решением уравнений Эйлера.

Исследуется образование, перенос и диффузия вихревых структур поверхностью вращающегося бесконечного цилиндра. Строится решение в различных асимптотических областях, которое определяет изменение поля завихренности по времени.

Во всех рассмотренных задачах изменение поля завихренности происходит благодаря вязкости. Хорошо известна задача о диффузии одиночного вихря в несжимаемой жидкости, когда этот процесс подчиняется простой зависимости: со временем область, занятая завихренностью, увеличивается, но поток завихренности при этом не меняется. В докладе будут рассмотрены более сложные течения жидкости и газа. Обсуждаются вопросы о влиянии на диффузию других вихрей, твердых поверхностей, температурного поля.

НЕСИММЕТРИЧНОЕ ОТРЫВНОЕ ОБТЕКАНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО КРЫЛА

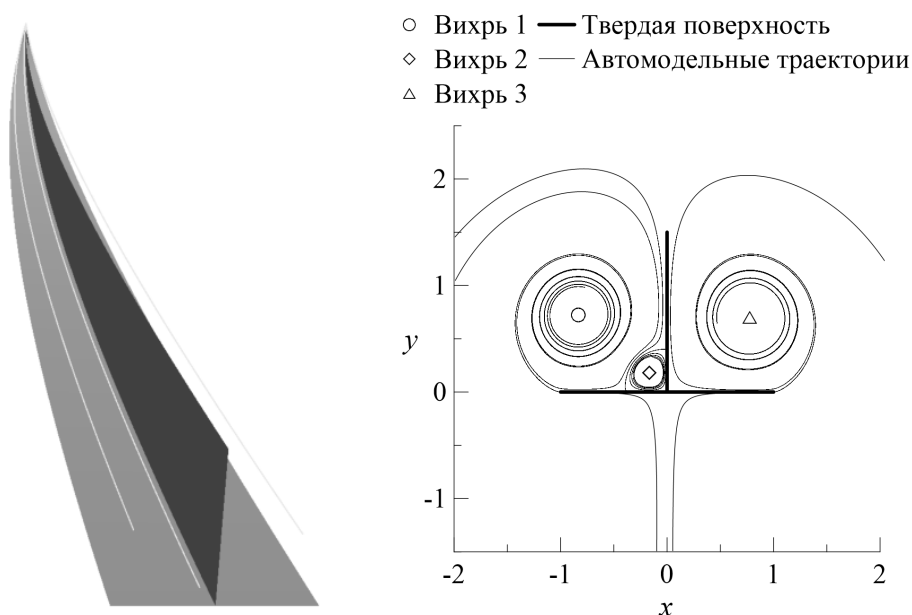
А. М. Гайфуллин, В. В. Жвик

Московский физико-технический институт

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

Исследуется отрывное обтекание потоком невязкой несжимаемой жидкости крыла малого удлинения, имеющего параболическую форму в плане и изогнутого по параболическому закону, с перегородкой в плоскости симметрии, высота которой растет по параболическому закону. В рамках нестационарной аналогии данная задача эквивалентна плоской автомодельной задаче о движении расширяющейся пластинки с перегородкой. При этом циркуляция вихревых образований не зависит от времени в силу предельного значения показателя автомодельности.

Симметричное решение задачи о параболическом крыле получено в работе [1]. В настоящей работе показано, что при симметричных граничных условиях помимо симметричного существует несимметричное решение. Изучена зависимость несимметричного решения от высоты перегородки и изогнутости крыла, а также устойчивость симметричного и несимметричного решений к малым возмущениям.



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00128).

ЛИТЕРАТУРА

1. Никольский А. А., Бетяев С. К., Малышев И. П. *О предельной форме отрывного автомодельного течения идеальной жидкости*. Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971. С. 262–268.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ “ТЕПЛОВОЙ ИГЛЫ” ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫМ ОБТЕКАНИЕМ ТЕЛ

П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин

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

Численно исследовано сверхзвуковое обтекание тел при наличии в набегающем потоке области энерговклада очень малого размера (по сравнению с размером миделева сечения тела) и тонкого высокотемпературного следа за ней – “тепловой иглы”.

Ранее показано [1], что снижение волнового сопротивления тел при помощи локализованного в набегающем потоке энерговклада в первую очередь обусловлено формированием передних отрывных зон. При стационарном обтекании затупленных тел статическое давление внутри изобарической передней отрывной зоны должно быть равно полному давлению за прямым скачком в высокотемпературном следе [2], которое не зависит от толщины следа (при сохранении некоторых критериев подобия для задачи об обтекании “энергоисточника”). Однако при “сквозном” численном моделировании нестационарного сверхзвукового обтекания затупленных тел при наличии вверх по потоку энергоисточников малого размера были обнаружены интенсивные “расходные” пульсации передних отрывных зон (что согласуется с [3]).

В настоящей работе изучено влияние числа Маха потока, размеров области энерговыклада и подводимой мощности на характеристики температурного следа и передних отрывных зон. Для обеспечения формирования квазистационарных передних отрывных зон применялась специальная временная модуляция параметров энерговыклада. Несмотря на то, что развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в слое смешения приводит к генерации вихревых структур и некоторым пульсациям передних отрывных зон, осцилляции волнового сопротивления остаются умеренными. Определены условия, обеспечивающие эффективное снижение волнового сопротивления тел. В расчетах для различных чисел Маха удалось достичь снижения волнового сопротивления 10 – 40% при очень высокой эффективности – сэкономленная мощность более чем в 100 раз превышала затраченную.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-29-01092).

ЛИТЕРАТУРА

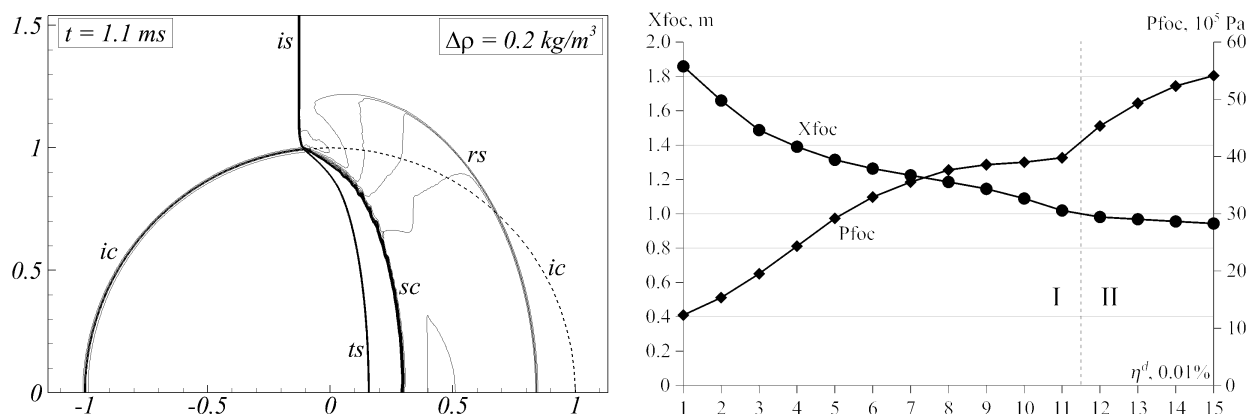
1. Георгиевский П. Ю., Левин В. А. *Управление обтеканием различных тел с помощью локализованного подвода энергии в сверхзвуковой набегающий поток*. Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 5. С. 152–165.
2. Гувернюк С. В., Савинов К. Г. *Отрывные изобарические структуры в сверхзвуковых потоках с локализованной неоднородностью*. ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 188–192.
3. Артемьев В. И., Бергельсон В. И., Немчинов И. В., Орлова Т. И., Смирнов В. А., Хазинс В. М. *Изменение режима сверхзвукового обтекания препятствия при возникновении перед ним тонкого разреженного канала*. Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 5. С. 146–151.

ЭФФЕКТ ФОКУСИРОВКИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОБЛАКОМ ПЫЛИ

П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин, О. Г. Сутырин

НИИ механики МГУ им М. В. Ломоносова, Москва

Распространение ударных волн по запыленному газу имеет место в широком круге задач, важными примерами которых являются взрывобезопасность угольных шахт и импульсные методы нанесения порошковых покрытий. Ключевую роль играет взаимодействие ударных волн с локальными облаками взвешенных частиц. В работе численно моделируется взаимодействие ударной волны с цилиндрическим облаком кварцевой пыли небольшой концентрации. Используется равновесная модель пылегазовой смеси, построенная на основе уравнений Эйлера [1]. Описан процесс преломления и фокусировки падающей ударной волны. Обнаружены два качественно различных режима взаимодействия – внешний и внутренний, – реализующиеся в зависимости от концентрации пыли в облаке. Определена зависимость положения пиковой точки фокусировки и интенсивности фокусировки волн от объемной концентрации пыли в диапазоне от 0.01% до 0.15%. При повышении концентрации пыли точка фокусировки приближается к границе и смещается внутрь облака, а интенсивность фокусировки существенно возрастает.



Слева: ранняя стадия взаимодействия, изолинии плотности. is – падающая ударная волна, ic – граница облака, ts – волна внутри облака, rs – отраженная волна. Справа: зависимость удаления точки пиковой фокусировки (X_{foc}) и давления в этой точке (P_{foc}) от концентрации пыли в облаке. I и II – области внешнего и внутреннего режимов фокусировки соответственно.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-11-00773) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-29-01092).

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгиевский П. Ю., Левин В. А., Сутырин О. Г. *Фокусировка ударной волны при взаимодействии ударной волны с цилиндрическим облаком пыли*. Письма в "Журнал технической физики". 2016. Т. 42. № 18. С. 17–24.

УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОБОЛОЧЕК И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ЧАСТИЦАМИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

А. В. Герасимов, С. В. Пашков, Ю. Ф. Христенко

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета

Высокая насыщенность околоземного пространства космическим мусором, образовавшимся при разрушении космических аппаратов, потоки микрометеороидов, идущих из глубин космоса представляют реальную угрозу для пилотируемых и автоматических аппаратов. Поэтому исследование характера высокоскоростного взаимодействия частиц космического мусора и микрометеороидов с оболочками и элементами конструкции космических аппаратов и возможные способы защиты от этих частиц представляют важную задачу. В работе рассматривается соударение оболочек и элементов конструкций из нетрадиционных материалов (стекло, абботекстолит) с алюминиевыми и стальными частицами, моделирующими космический мусор и с частицами гранита, моделирующими естественные частицы космического пространства.

Трехмерное моделирование взаимодействия преград с высокоскоростными ударниками базируется на уравнениях, описывающих пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, которые являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона для расчета контактных взаимодействий. Процесс разрушения стекла, гранита рассматривался, как процесс разрушения хрупкого материала, без участка пластического деформирования, характерного для деформирования металлов. Для расчета поведения упругопластических материалов используется модель Джонсона–Кука, при расчетах хрупких материалов использовалась модель Джонсона–Холмквиста. При решении задач в трехмерной постановке учитывается естественная неоднородность структуры реальных материалов, влияющая на распределение физико–механических характеристик по объему элементов конструкций и являющаяся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Начальные неоднородности материала учитываются вероятностным распределением критерия разрушения по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения.

Для исследования процессов высокоскоростного взаимодействия использовалась трехступенчатая пневматическая легкогазовая установка, позволяющая метать ударники до 8 км/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-08-00037 А, 15-08-06689 и 15-08-02265 А).

МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕДИ, ПОСТРОЕННОЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО СТАТИЧЕСКОМУ И УДАРНОМУ СЖАТИЮ

С. Д. Гилев

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

Одной из основных научных проблем в области физики и механики высокоэнергетических процессов является построение адекватного уравнения состояния вещества, пригодного для анализа воздействия высоких плотностей энергии на материалы и конструкции. В настоящее время широкое распространение получили полуэмпирические широкодиапазонные уравнения состояния. Такие уравнения состояния позволяют прогнозировать отклик материала в различных областях ударных нагрузок. Обратной стороной таких уравнений состояний является их сложность и большое количество подгоночных констант (доходящих до нескольких десятков).

Большое количество параметров в широкодиапазонных уравнениях, а также сложности однозначного определения подгоночных констант стимулируют развитие малопараметрических уравнений состояния вещества. Такие уравнения не могут претендовать на описание всего спектра физических состояний вещества, но могут быть полезны как в ограниченной области (p, V, T) (давление, удельный объем, температура), так и в численных расчетах сложных процессов, где уравнение состояния не является определяющей частью задачи, а для понимания физического результата необходимо обеспечить прозрачность модели. Особое внимание

при таком подходе должно быть обращено на логику построения уравнения состояния, использование апробированных физических моделей, минимальное количество произвольных допущений и термодинамическую согласованность модели.

В настоящей работе для описания ударного сжатия конденсированного вещества предложено малопараметрическое уравнение состояния вещества в форме Ми-Грюнайзена. Уравнение основывается на постулируемой зависимости коэффициента Грюнайзена от удельного объема и температуры $\Gamma(V, T)$, качественно описывающей сжатие металлических образцов в сильных ударных волнах. По данной зависимости $\Gamma(V, T)$, используя формулу Ландау-Слэтера для коэффициента Грюнайзена, найдена кривая холодного сжатия. Тепловые колебания кристаллической решетки описываются в приближении Дебая. Значения коэффициентов уравнения состояния определяются по справочным данным для сплошного вещества при нормальных условиях. Модель имеет два свободных параметра, отражающих влияние на физическое состояние удельного объема и температуры. Апробация модели проведена для меди. Построенное уравнение состояния описывает кривую холодного сжатия, нормальную изотерму, ударную сжимаемость, а также кривые разгрузки меди в большом диапазоне изменения плотности, давления и внутренней энергии. Выполнены расчеты термодинамических характеристик меди (изэнтропический модуль объемного сжатия, скорость звука, температура Дебая, теплоемкость, коэффициент линейного расширения, кривая плавления). Сравнение с имеющимися на сегодняшний день опытными данными показывает, что построенная модель, несмотря на свою простоту, позволяет единообразно описать большой массив экспериментов в области высоких плотностей энергии.

ПРОХОЖДЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН ОТ ГРАНИЦ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ КОНТРАСТНЫХ ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В. Н. Говердовский, А. П. Константинов, С. В. Сухинин, А. В. Трилис, В. С. Юрковский

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

Актуальность исследований распространения волн в неоднородных средах обусловлена многочисленными применениями в технике и технологиях. Для моделирования волновых процессов, удобно считать, что неоднородные среды являются фононными кристаллами – имеют пространственную периодичность. В основном, существующие методы изучения волновых процессов в неоднородных средах базируются на учете интегральных (осредненных по пространству) характеристиках (плотность, скорость звука и т.п.), что не позволяет описать тонкую специфику механики распространения волн. Принципиально иным является подход, учитывающий пространственные особенности распределения некоторых объединений неоднородностей, например периодичность или пространственную повторяемость таких объединений [1]. В работе [2] изложена методика определения концентрации компонент в двухкомпонентной гетерогенной среде при помощи определения скорости распространения длинных волн, основанная на результатах [1]. Важными прикладными задачами исследования фононных кристаллов являются:

1. Исследование замедляющих свойств неоднородных одномерно-периодических структур.
2. Определение полос запираения и пропускания.

3. Исследование резонансных свойств периодических неоднородных структур с компактными и распределенными источниками колебаний.
4. Звукоизолирующие и звукопоглощающие свойства неоднородных сред.
5. Прохождение и отражение волн от границы контакта двух различных сред: фононный кристалл — однородная среда; однородная среда — фононный кристалл, фононный кристалл — фононный кристалл.

Задачи 1-3 частично изучены в работе [1]. В настоящей работе изложена методика и результаты решения задач 4-5, описана приближенная численно-аналитическая модель нахождения коэффициентов отражения и прохождения падающего на границы раздела элементарного волнового пакета. Проведены численно-аналитические исследования влияния геометрических и физических параметров двух сред на коэффициенты прохождения и отражения от границы раздела.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 17-19-01389).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухинин С.В. *Распространение волн и резонансные явления в неоднородных средах*. ПМТФ. 2001. Т. 42. № 3. С. 32–42.
2. Сухинин С.В. *Метод акустического зондирования неоднородной двухкомпонентной среды*. ДСС/ АН СССР. Сиб. отд-ние. Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. 2010. В. 126. С. 142–145.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАНОСТЕРЖНЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

И. Ф. Головнев¹, Е. И. Головнева¹, Л. А. Мержиевский²

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

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В работе [1] было обнаружено, как процесс распространения линейных волн лавинообразно переходит к режиму формирования трансформационных (или аморфизационных) волн. Одно из возможных объяснений данному явлению — потеря устойчивости. Таким образом, настоящая работа посвящена фундаментальной проблеме — исследованию на атомном уровне физических основ устойчивости по Эйлеру.

Для этой цели в работе применен метод молекулярной динамики (ММД). Решалась конкретная задача сжатия металлических наноструктур, имеющих форму прямоугольных параллелепипедов, и получения однородных состояний по длине наноструктуры.

Поставленная цель обусловила проведение работ в следующей последовательности:

1. Создание метода адиабатического сжатия наноструктуры.

2. Исследование характеристик наноструктуры в момент потери устойчивости при адиабатическом сжатии и определение интервала внешних напряжений, для которых наноструктуры сохраняют устойчивость.
3. Моделирование адиабатического снятия искусственной вязкости.
4. Формирование в пространстве однородного состояния сжатого стержня.

Методика и комплекс программ молекулярно-динамического исследования процессов распространения возмущений в наноструктурах проходили отладку на примере медного кластера, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, размеры которого составляли $50 \times 5 \times 5$ и $200 \times 5 \times 5$ кристаллических ячеек вдоль осей координат XYZ, соответственно.

В результате отработана методика расчета максимального сжатия наноструктуры, имеющей форму параллелепипеда («стержень» на микроуровне) при условии получения стационарного состояния, с однородным распределением термомеханических характеристик по пространству. Доказано, что необходимым условием такого нагружения в рамках ММД является монотонный рост внешней нагрузки (при условии малости ее производной по времени) до заданной внешней амплитуды напряжения и наличия искусственной вязкости. Детализированный расчет показал, что точка бифуркации (с точностью до 0.01 ГПа) в смене синергетического режима формирования ударных волн, совпадает с точкой бифуркации смены режима потери устойчивости при адиабатическом сжатии наностержня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головнев И. Ф., Головнева Е. И., Мержиевский Л. А., Фомин В. М. *Генерация дефектов, как явление самоорганизации структуры под влиянием внешних нагрузок*. Физ.мезомех. 2013. Т. 16. № 3. С. 35–43.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМБОЛИЗАЦИИ КАК ЗАДАЧИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Т. С. Гологуш¹, А. А. Черевко², И. А. Петренко³, В. В. Остапенко²

¹Новосибирский государственный университет

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Владимирский государственный университет

Артериовенозная мальформация (АВМ) является сложным и опасным пороком развития сосудов головного мозга. Эндovasкулярная эмболизация АВМ является эффективным средством лечения данных патологий. Тем не менее, все еще существует опасность разрыва АВМ во время операции и в течении нескольких часов после ее окончания. Цель данной работы состоит в том, чтобы смоделировать процесс эмболизации и построить оптимизационный алгоритм эмболизации АВМ.

В силу своей структуры АВМ может адекватно моделироваться пористой средой. Процесс эмболизации описывается в этой модели внедрением в пористую среду, заполненную жидкостью (кровью), другой жидкости (эмболизата), несмешивающейся с первой. Такой процесс

в одномерном приближении описывается уравнением Баклея-Леверетта, которое решается численно с помощью новой модификации схемы Кабаре. Для проверки пригодности метода при расчете задач эмболизации, были проведены численные эксперименты [1].

Предложенная модель оптимальной эмболизации имеет новые принципиальные особенности. На процесс эмболизации накладывается требование об ограничении удельной нагрузки на узел АВМ при эмболизации [2]. Оно формулируется в виде:

$$\Delta E/V \leq W_{max}.$$

где ΔE — энергия, рассеиваемая в АВМ за единицу времени, V — объем АВМ, W_{max} — предельное допустимое значение удельной нагрузки. Процесс эмболизации описывается как процесс оптимального управления, в котором, управляя концентрацией эмболизата на входе в АВМ, нужно добиться максимально возможной ее эмболизации за конечное время при выполнении ограничения.

Показано, что оптимальное управление состоит из интервалов, на которых либо концентрация крови на входе в АВМ достигает минимального допустимого значения, либо в процессе эмболизации постоянно поддерживается предельно допустимая нагрузка W_{max} .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ № 14.W03.31.0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cherevko A. A., Gologush T. S., Ostapenko V. V., Petrenko I. A., Chupakhin A. P. *Modeling process of embolization arteriovenous malformation on the basis of two-phase filtration model*. J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 722. 012009.
2. Кривошапкин А. Л., Чупахин А. П. и др. *Алгоритм предупреждения гемодинамических кровоизлияний при эмболизации церебральных артериовенозных мальформаций*. Бюллетень СО РАМН. 2013. Т. 33. № 6. С. 65–73.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. К. Голушко

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Первая часть доклада посвящена математическому моделированию свойств композитов. Обсуждаются два основных подхода: феноменологический и структурный [1]. В рамках первого подхода армированные материалы моделируются однородной анизотропной средой с эффективными физико-механическими свойствами. Механические параметры материала определяются, при этом, из экспериментов. При структурном подходе физико-механические характеристики композита выражаются через характеристики его компонентов и параметры армирования, что открывает широкие возможности для улучшения свойств композитных конструкций. Разработан и реализован комплексный подход к построению математических моделей нелинейно-упругого деформирования полимерных матриц и углепластиков при изгибе, учитывающий эффект разносопротивляемости при растяжении и сжатии [2].

Вторая часть доклада посвящена методам решения краевых задач механики упругих композитных пластин и оболочек. Рассматриваемые системы дифференциальных уравнений имеют высокий порядок, переменные коэффициенты, малые параметры, приводящие к появлению краевых эффектов. Рассмотрены различные аспекты применения методов дискретной ортогонализации, сплайн-коллокации, коллокаций и наименьших невязок для задач механики упругих пластин и оболочек в классической и уточненных постановках [3, 4].

В третьей части доклада рассмотрены задачи рационального и оптимального проектирования композитных пластин и оболочек. Получены условия разрешимости, аналитические и численные решения задач рационального проектирования пластин и оболочек, сосудов давления, изготовленных из композиционных материалов. Рассмотрена задача моделирования, расчета и оптимизации напряженно-деформированного состояния металлокомпозитного бака высокого давления [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Голушко С. К., Немировский Ю. В. *Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
2. Амелина Е. В., Голушко С. К., Ерасов В. С., Идимешев С. В., Немировский Ю. В., Семисалов Б. В., Юрченко А. В., Яковлев Н. О. *О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет*. Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 5. С. 27–52.
3. Голушко С. К., Идимешев С. В., Шапеев В. П. *Метод коллокаций и наименьших невязок в приложении к задачам механики изотропных пластин*. Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 6. С. 31–43.
4. Голушко С. К., Идимешев С. В., Шапеев В. П. *Разработка и применение метода коллокаций и наименьших невязок к решению задач анизотропных слоистых пластин*. Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 24–36.
5. Амелина Е. В., Буров А. Е., Голушко С. К., Лепихин А. М., Москвичев В. В., Юрченко А. В. *Расчетно-экспериментальная оценка прочности металлокомпозитного бака высокого давления*. Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 5. С. 3–21.

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНИЗОГРИДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

С. К. Голушко, Б. В. Семисалов

Новосибирский государственный университет

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Анизотридные сетчатые элементы корпусов ракетоносителей, выполненные из однонаправленных углепластиков, являются перспективным технологическим решением космической отрасли [1]. Стремление к минимизации веса таких элементов при их проектировании приводит к уменьшению коэффициентов запаса прочности, что требует описания деформирования конструкций с высокой степенью достоверности и точности и организации счета с максимальной временной эффективностью.

Для достоверного описания деформирования анизотридной конструкции будем исходить из классических уравнений теории упругости без дополнительных гипотез и упрощений. При

этом для осреднения характеристик жесткости ребер конструкции используем континуальный подход и концепцию “размазывания” [2], [3]. В работе сформулированы две пространственные постановки задач деформирования – в перемещениях и в напряжениях. Численные решения этих постановок сопоставлены друг с другом, показано их совпадение с высокой точностью.

Точность методов, использованных для расчетов, основана на оригинальном способе дискретизации разрешающих соотношений полученных постановок – приближениях без насыщения и спектральном методе на основе ряда Фурье и полиномов Чебышева [4]. Такие приближения для любого класса гладкости искомых функций асимптотически совпадают с наилучшими полиномиальными приближениями.

Временная эффективность обеспечена в работе экспоненциальной скоростью сходимости методов без насыщения на гладких решениях, а также оригинальной схемой предложенного алгоритма, позволяющей снизить объем вычислений на 5 порядков по сравнению с классической схемой метода коллокаций [4].

Разработанные модели и методы использованы для расчета и оптимизации анизотропного переходного отсека между первой и второй ступенями ракеты носителя ПРОТОН-М. Получены оптимальные проекты отсека, выдерживающего заданные неосесимметричные стартовые нагрузки при минимальном весе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В. В., Барынин В. А., Разин А. Ф., Петроковский С. А., Халиманович В. И. *Анизотропные композитные сетчатые конструкции – разработка и применение к космической технике*. Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38–50.
2. Образцов И. Ф., Рыбаков Л. С., Мишустин И. В. *О методах анализа деформирования стержневых упругих систем регулярной структуры*. Механика композиционных материалов и конструкций. 1996. Т. 2. № 3. С. 3–14.
3. Голушко С. К., Семисалов Б. В. *Численное моделирование деформирования анизотропных конструкций с применением высокоточных схем без насыщения*. Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 6. С. 23–45.
4. Семисалов Б. В. *Быстрый нелокальный алгоритм решения краевых задач Неймана-Дирихле с контролем погрешности*. Выч. мет. Программирование. 2016. Т. 17 № 4. С. 500–522.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕД С НЕСУЩЕЙ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ

Р. Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ

Предложен подход к теоретическому описанию изменения реологических свойств высокомолекулярных жидких и жидкодисперсных сред под воздействием кавитации. В рамках подхода производится двухуровневое рассмотрение данных процессов на микро- и макроуровне.

На микроскопическом уровне проводятся исследования возможности кавитационного разрушения отдельных макромолекул жидкой фазы и, если таковые присутствуют, дисперсных частиц, взвешенных в жидкости.

Для анализа разрушения молекул предложен физический механизм, основанный на том, что распад молекулы происходит тогда и только тогда, когда скорость столкновения молекул превышает определенное пороговое значение, при котором преодолевается потенциальное поле сил водородных или углеродных связей. При этом возникновение ударной волны при схлопывании кавитационного пузырька приводит к увеличению вероятности столкновения молекул со скоростью, превышающей пороговую. Для определения вероятности распада дисперсных частиц предполагалось, что частица распадается тогда и только тогда, когда кавитационный пузырек схлопывается внутри некоторого объема жидкости вокруг частицы, именуемого “окрестностью распада” [1].

Найденные вероятности распада макромолекул и дисперсных включений позволяют определить эволюцию фракционного состава структурных элементов среды на макроскопическом уровне. Затем на основании статистического подхода, методов физической кинетики и механики многофазных сред рассчитываются компоненты тензора вязких напряжений, позволяющие определить эффективную вязкость среды [2], от которой зависит пропитывающая способность, прочностные свойства полимерного композиционного материала после добавления отвердителя и т. д. Все это позволяет рассчитать оптимальные режимы кавитационного воздействия, обеспечивающие максимальное изменение реологических свойств сред.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-01298).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелев В. Н., Голых Р. Н., Доровских Р. С., Ильченко Е. В., Шакура В. А. *Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового кавитационного воздействия, обеспечивающих максимальное увеличение межфазной поверхности эмульсий и суспензий*. Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы. 2016. С. 43–45.
2. Golykh R. N. *Gaseous bubble oscillations in anisotropic non-Newtonian fluids under influence of high-frequency acoustic field*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 722. Conf. 1. 8 p.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АБСОРБЦИИ

Р. Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ

Проблема искусственного разделения газовых смесей (очистка газообразных продуктов сгорания от ядовитых веществ, получение химически чистых газов и т. д.) стоит на протяжении 100 лет [1]. Для разделения газов в настоящее время наиболее широко применяется

абсорбция целевого газового компонента специальной жидкостью-абсорбентом. Один из перспективных способов повышения эффективности абсорбции – воздействие ультразвуковыми колебаниями, которые увеличивают межфазную поверхность “газ-жидкость” и ускоряют диффузию газа в жидкость-абсорбент [1, 2].

Для выбора режимов, обеспечивающих максимальную эффективность абсорбции, необходимо проведение экспериментальных исследований процесса при различных параметрах ультразвукового воздействия и течения взаимодействующих фаз.

В связи с этим автором предложена конструкция и обоснованы требования к экспериментальному стенду для исследований эффективности ультразвуковой интенсификации абсорбции газового компонента жидкостью. Для выработки требований к стенду проведены теоретические исследования диффузии абсорбируемого газа в двухслойной системе “газ-жидкость”. На основании полученных теоретических результатов установлены требования к геометрическим размерам технологического объема, в котором будет протекать абсорбционный процесс, частоте колебаний, мощности ультразвукового излучателя, площади излучающей поверхности, расходу жидкости-абсорбента и пневматическому давлению абсорбируемого газа. В соответствии с выявленными требованиями предложена и разработана конструкция стенда. Затем на базе малого инновационного предприятия ООО “Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ” реализовано изготовление стенда, который позволит определить режимы ультразвукового воздействия и течения фаз, обеспечивающие максимальную эффективность абсорбции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4515.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Golykh R. N. *The Modeling of Absorption in two-Layer System "Gaseous Mixture-Liquid" Under Ultrasonic Vibrations Influence*. American Journal of Engineering Research. 2016. Vol. 5. Iss. 12. Pp. 37-45.
2. Голых Р. Н., Шакура В. А., Ильченко Е. В. *Исследование формирования кавитационной области вблизи границы раздела “жидкость-газ” для выявления режимов, обеспечивающих максимальное увеличение поверхности контакта фаз*. Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. 2016. С. 19-22.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА НАНОТЕРМИТА CuO/Al

В. В. Гордеев, М. В. Казутин, Н. В. Козырев

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск

Нанотермиты – смеси металлического горючего и оксида менее активного металла в качестве окислителя, усредненные на наноуровне – обладают уникальными взрывчатыми характеристиками, в т.ч. способностью к горению с высокой скоростью в микроколичествах и узких каналах. Такие свойства наряду с низкой токсичностью продуктов реакции позволяют рассматривать нанотермиты в качестве перспективной основы воспламенительных и иницирующих составов, использовать в MEMS устройствах. Широкому использованию препятствует ряд недостатков: высокая чувствительность к трению и эклектической искре,

сильная зависимость свойств от плотности, размерности компонентов, эффекты “старения” и т.п. Одним из способов нивелирования представленных недостатков является введение в нанотермитную систему различного типа модифицирующих добавок.

Объектом исследования в настоящей работе является нанотермитная система CuO/Al, в состав которой вводились добавки различного назначения, включая полимерные связующие (каучук СКИ-НЛ, фторопласты СКФ-26 и Ф-42, полидиметилсилоксан ПМС-20); углеродные нанотрубки различной структуры (много- и однослойные). Экспериментально определялись взрывчатые свойства (скорость и критическая толщина взрывчатого превращения), а также чувствительность к трению и электростатической искре.

В целом показано, что приемлемый в технологической переработке уровень чувствительности нанотермитной системы CuO/Al достигается введением достаточного количества той или иной добавки или их композиций, однако при этом взрывчатые характеристики значительно снижаются, вплоть до потери такого уникального свойства, как способность к горению в узких каналах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОЛЯРНОЙ ЖИДКОСТИ С ПАВ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА

В. Ю. Гордеева¹, А. В. Люшин²

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Лысьвенский филиал*

²*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет*

В последние несколько десятилетий техника и технология идет по пути миниатюризации, создавая все более чувствительные приборы и более точные медицинские инструменты. Тонкие жидкие пленки могут играть в изготовлении отдельных элементов немалую роль, например, можно получить тонкий слой вещества с заданными свойствами, нанося растворенное вещество на указанную поверхность и испаряя жидкий растворитель. При этом не стоит забывать о свойствах растворяющей жидкости, которые могут повлиять на конечный результат.

Уже установлено, что в тонких пленках порядка 100 \AA приобретают значение силы межмолекулярного взаимодействия, которые являются одной из составляющих расклинивающего давления. Это внутреннее давление тонкой пленки жидкости, описанное Дерягиным, заставляет жидкость приобретать некоторую устойчивую толщину, компенсируя давление пара. Согласно [1], в расклинивающее давление входит четыре компонента: молекулярное взаимодействие, электростатическое взаимодействие в полярных жидкостях, адсорбционная составляющая, связанная с влиянием примесей, и структурное слагаемое, определяемое отличием структуры граничных слоев от объемной фазы.

В представленной работе мы рассмотрели тонкий слой испаряющейся полярной жидкости с добавлением поверхностно-активного вещества. Слой лежит на твердой гладкой подложке из полярного вещества и ограничен сверху деформируемой межфазной границей жидкость-газ. Добавленный ПАВ хорошо растворяется на свободной границе, но выпадает в осадок на твердую подложку. Известно, что ПАВ на свободной границе создает условия для концентрационного эффекта Марангони из-за возникающего градиента поверхностного натяжения, а ПАВ, десорбированный на подложке, вносит вклад в расклинивающее давление. Таким образом, расклинивающее давление в модели состоит из трех компонентов: межмолекулярное

взаимодействие, электростатическое взаимодействие, и влияние ПАВ, осевшего на подложку. Задачей моделирования было воспроизвести результат экспериментальной работы [2]. Для этого были выведены уравнения эволюции слоя и концентрации ПАВ на обеих межфазных границах. Затем полученные уравнения решались на ЭВМ с использованием полуявного метода Кранка-Николсон и метода прогонки.

В результате расчетов были получены профили пленки, концентрации ПАВ на свободной границе и концентрации ПАВ на подложке по истечении заданного количества времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б. В. *Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок*. М.: Наука, 1986.
2. Gokhale S. J., Plawsky J. L., Wayner P. C. *Spreading, evaporation, and contact line dynamics of surfactant-laden microdrops*. *Langmuir*. 2005. V. 21. № 18. Pp. 8188–8197.

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Т. Н. Гороженинова, А. А. Киченко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Костная ткань живого человека является сложной, динамической структурой, в которой непрерывно происходят адаптационные процессы. Она делится на компактную (кортикальную) и трабекулярную (губчатую) кость. Трабекулярная костная ткань является неоднородным пористым анизотропным материалом, механические свойства которой в значительной мере определяются ее внутренней архитектурой. Под действием новой нагрузки, в структуре трабекулярной костной ткани могут начаться адаптационные изменения, которые затем повлияют на кортикальную костную ткань. Известно, что адаптационные процессы, протекающие в организме человека, подчиняются закону Вольфа (Wolff's law). Закон Вольфа для костной ткани [1, 2, 3, 4] говорит о том, что архитектура трабекулярной кости в локальной области структурно приспособляется к местному напряженному состоянию костной ткани. Математически, процесс адаптации кости можно описать системой дифференциальных уравнений, позволяющих наблюдать изменение структуры и доли твердого объема кости относительно отсчетной величины во времени:

$$\frac{d\tilde{K}}{dt} = f_1(\tilde{K}, e); \quad \frac{de}{dt} = f_2(\tilde{K}, e).$$

Для верификации данной модели, исследовалось напряженно-деформированное состояние анизотропных структуры под воздействием различных типов нагрузки, а также рассматривался ряд задач, описанных в работах [1, 2, 5]. Разработанный численный алгоритм показал соответствие результатов положениям закона Вольфа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15–01–04884–а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Cowin S. C. *An evolutionary Wolff's law for trabecular architecture*. J. Biomech. Engng. 1992. V. 114. Pp. 129–136.
2. Гороженинова Т. Н., Киченко А. А. *Решение задачи о перестройке трабекулярной костной ткани в конечно-элементном пакете ANSYS*. В кн. Биомеханика-2016: тез. докл. XII всерос. конф. Пермь 5-8 декабря 2016. Издательство Пермского государственного технического университета. С. 36–37.
3. Киченко А. А., Тверье В. М., Няшин Ю. И., Осипенко М. А., Лохов В. А. *О приложении теории перестройки трабекулярной костной ткани*. Российский журнал биомеханики. 2012. Т. 16. № 4. С. 53–72.
4. Киченко А. А., Тверье В. М., Няшин Ю. И., Осипенко М. А., Лохов В. А. *Постановка начально-краевой задачи о перестройке трабекулярной костной ткани*. Российский журнал биомеханики. 2012. Т. 16. № 4. С. 36–52.
5. Лехницкий С. Г. *Теория упругости анизотропного тела*. Изд. 2-е. М., Главная редакция физико-математической литературы издательства “Наука”, 1977.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВМРОЖЕННУЮ В КРУГЛУЮ ЛЬДИНУ ОПОРУ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СОБСТВЕННЫМИ И КВАЗИСОБСТВЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

А. Г. Грешилов, С. В. Сухинин

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

Цель работы. Определение динамических нагрузок на опору со стороны ледяной пластины в зависимости от формы дна около опоры. Исследование поведения собственных и квазисобственных частот колебаний упругой ледяной пластины, плавающей на поверхности идеальной несжимаемой жидкости, в зависимости от геометрических параметров задачи.

Актуальность. Интерес к этой работе обусловлен потребностью развития современной техники и технологий. Например, для полярной механики характерной является задача о воздействии волновых возмущений на опору морской платформы, вмержшую в плавающую льдину. Собственные или квазисобственные колебания льдины позволяют определить механическое воздействие со стороны этих колебаний на вмержшую опору.

Данная краевая задача сводится к решению дифференциального уравнения 6-го порядка относительно потенциала скоростей жидкости для области с упругой пластиной и решению уравнения Гельмгольца относительно потенциала скоростей жидкости для области со свободной поверхностью. Рассматриваются два случая для пластины, примороженной к опоре: в бассейне ограниченного размера и в бассейне неограниченного размера. Численно рассчитываются значения собственных и квазисобственных частот в зависимости от различных вариаций геометрических параметров. Определяется зависимость от неровности дна выдергивающих опору сил со стороны пластины в условиях набегающей плоской волны. Определяются формы изгибно-гравитационных колебаний упругой пластины.

Установлено, что первая мода колебаний упругой пластины создает перерезывающие силы и моменты, действующие на опору со стороны упругой пластины, тем самым задавая

периодическую выдергивающую опору силу. Установлено, что при увеличении глубины под пластиной при фиксированной глубине в области со свободной поверхностью жидкости воздействие на опору со стороны выдергивающих сил уменьшается. Показано, что при увеличении радиуса бассейна значения собственных частот колебаний пластины уменьшаются и стремятся к собственным частотам плескания ограниченного бассейна.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ЛАМЕ

Ю. М. Григорьев

*Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск
Академия наук Республики Саха (Якутия)*

Пусть граница $S = S_1 \cup S_2$ элемента конструкции состоит из двух частей S_1 и S_2 . Часть S_1 доступна для измерений, а часть S_2 – не доступна. В инженерной практике возникает необходимость восстановления напряженно-деформированного состояния внутри такого элемента конструкции по данным измерений на S_1 . В рамках упругой модели такая постановка приводит к необходимости решения задачи Коши для эллиптической системы уравнений Ламе (векторного уравнения Ламе). Такие задачи являются условно корректными и основная трудность состоит в неустойчивости задачи. Для приближенного решения задачи Коши в теории упругости разработаны численные методы, основанные на различных методах регуляризации (см. [1, 2]).

Для более простого случая уравнения Лапласа имеются различные варианты постановки задачи Коши. В первой из них необходимо найти гармоническую функцию в цилиндрической области $\Omega = S \times (0, T) \in \mathbb{R}^3$, ограниченной нижним основанием $S_1 \in \mathbb{R}^2$, боковой поверхностью S_2 и верхней поверхностью S_3 . На S_1 задаются данные Коши: $u = f$, $\partial u / \partial n = g$, на боковой поверхности S_2 задаются обычные краевые условия, например, $u = 0$, на верхней поверхности краевые условия не заданы. Такая задача называется начально-краевой задачей для уравнения Лапласа (см. Гл.9 в [1]). В другой постановке имеется ограниченная область $\Omega \in \mathbb{R}^3$ с граничной поверхностью $S = S_1 \cup S_2$ и данные Коши заданы на части S_1 границы S . Мы будем иметь дело с аналогом первой постановки в теории упругости внутри прямоугольника. Автору неизвестны публикации об аналитических методах решения такой задачи в теории упругости. Известные результаты с использованием метода Карлемана касаются аналога второй постановки в теории упругости.

В данной работе предлагается аналитический метод решения задачи Коши для уравнения Ламе внутри прямоугольника. Данный метод является обобщением метода Лиу [3] решения задачи Коши для уравнения Лапласа. Приближенное регуляризованное решение задачи получено в виде суммы абсолютно и равномерно сходящихся рядов, содержит три параметра регуляризации. Получены оценки для отклонения приближенного решения от точного. Численные примеры показывают эффективность нового метода. Плоская задача рассмотрена для простоты, метод непосредственно обобщается на трехмерную задачу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-41-05081).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабанихин С. И. *Обратные и некорректные задачи*. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009.
2. Durand B., Delvare F., Bailly P. *Numerical solution of Cauchy problems in linear elasticity in axisymmetric situations*. Int. J. Sol. Str. 2011. V. 48. Pp. 3041–3053.
3. Liu C.-S. *An Analytical Method for the Inverse Cauchy Problem of Laplace Equation in a Rectangular Plate*. J. Mech. 2011. V. 27. N. 04. Pp. 575–548.

ВЛИЯНИЕ “ВЯЗКОЙ” СТРАТИФИКАЦИИ И КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА ДВУХАТОМНОГО ГАЗА

Ю. Н. Григорьев¹, И. В. Ершов^{1,2}

¹Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Исследована линейная устойчивость вязких двумерных возмущений в сверхзвуковом плоском течении Куэтта совершенного и колебательно-возбужденного газов. В обоих случаях рассматривалась альтернатива, когда коэффициенты переноса либо принимались постоянными, либо зависящими от статической температуры потока. Для учета температурной зависимости сдвиговой вязкости использовалась модель Сазерленда [1, 2]. Показано, что “вязкая” стратификация совершенного газа в модели Сазерленда как при учете температурного градиента вязкости ($\eta_{T,s} \neq 0$) в уравнениях спектральной задачи, так и без его учета ($\eta_{T,s} = 0$) существенно усиливает стабилизацию течения. В частности, в диапазоне чисел Маха $3 \leq M \leq 15$ критическое число Рейнольдса моды II, остающейся наиболее неустойчивой при всех числах Маха $M \geq 3$, возрастает примерно в $3 \div 6$ раз для $\eta_{T,s} \neq 0$ и в $1.5 \div 2$ раз для $\eta_{T,s} = 0$ по сравнению с моделью постоянной вязкости, хотя соответствующие волновые числа α увеличиваются в пределах 20 % для $\eta_{T,s} = 0$ и 38 % для $\eta_{T,s} \neq 0$. При этом относительное уменьшение инкрементов нарастания вязких возмущений мод I и II при колебательном возбуждении практически одинаково для обеих моделей вязкости и условий $\eta_{T,s} \neq 0$, $\eta_{T,s} = 0$, при этом увеличение критического числа Рейнольдса во всех рассматриваемых случаях лежит в пределах 12 %. Вместе с тем более простая модель постоянной вязкости на качественном уровне полностью воспроизводит все характерные особенности развития вязких возмущений акустических мод I и II в совершенном газе [1, 2]: дестабилизацию устойчивой в невязком пределе моды I в узком диапазоне волновых чисел α в окрестности $M \approx 3$; существенное увеличение инкремента нарастания моды II по сравнению с невязким пределом при $\alpha \approx 1.5$ для сверхзвукового диапазона $5 \leq M \leq 15$; характерное поведение кривых нейтральной устойчивости в координатах (α, Re) при $5 \leq M \leq 15$, в частности, расширение области неустойчивости с ростом Re и наличие двух минимумов на верхней ветви; немонотонную зависимость критического числа Рейнольдса Re_{cr} от числа Маха с незначительным сдвигом минимума в точку $M \approx 6$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-01-00209).

ЛИТЕРАТУРА

1. Grigor'ev Yu. N., Ershov I. V. *Linear stability of Couette flow of vibrationally non-equilibrium gas*. AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. Pp. 030043-1–030043-12.
2. Григорьев Ю. Н., Ершов И. В. *Линейная устойчивость сверхзвукового течения Куэтта молекулярного газа в условиях вязкой стратификации и возбуждения колебательной моды*. Изв. РАН. МЖГ. 2017. № 1. С. 11–27.

О ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ
ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Е. Ф. Грязнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Работа посвящена экспериментальным исследованиям динамических характеристик пластичности стальных оболочек при скорости деформаций ($10^4 \dots 10^6$) s^{-1} . Исследовались оболочки, изготовленные из мало- и высокоуглеродистых сталей, обладающих широким диапазоном исходных механических характеристик. Взрывное нагружение проводилось с использованием взрывчатых составов, скорость детонации которых составляла от 3000 м/с до 8000 м/с. Толщина стенки оболочек также варьировалась — испытывались оболочки с относительной толщиной стенки $\bar{\Delta}_0 = 0.01 \dots 0.25$ ($\bar{\Delta}_0 = \Delta_0/D$, Δ_0 — толщина стенки, D — внешний диаметр оболочки).

В работе рассмотрено влияние перечисленных выше факторов на характеристики динамической пластичности — относительные удлинение и сужение материала оболочек. Методом металлографии исследованы неоднородность радиального распределения деформаций в стенке оболочки. Установлено определяющее влияние механизма разрушения на характеристики динамической пластичности.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ПУАЗЕЙЛЯ В КАНАЛЕ
ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ

К. В. Демьянко

Институт вычислительной математики РАН, Москва

Пульсирующее течение в канале эллиптического сечения с податливыми стенками характерно для физиологических потоков типа движения крови в сосудах. Знание закономерностей неустойчивости такого течения необходимо, например, для построения адекватных моделей гемодинамики, полезных при выборе терапии и прогноза результатов хирургических операций (известно, что неустойчивость потока крови наблюдается при ряде заболеваний, например, при аневризме сосудов головного мозга). Как и в случае течения в канале прямоугольного сечения [1], важной особенностью такого течения является зависимость [2] его устойчивости от соотношения масштабов в направлениях, перпендикулярных направлению потока.

Исследовать эту особенность можно, рассматривая более простое течение — течение Пуазейля в бесконечном в продольном направлении канале постоянного эллиптического сечения. Для упомянутых физиологических потоков основными характеристиками устойчивости являются энергетическое число Рейнольдса, максимальная амплификация кинетической энергии возмущений и оптимальные возмущения. В докладе рассматривается течение Пуазейля в канале эллиптического сечения и обсуждается зависимость этих характеристик устойчивости от величины отношения длин полуосей эллипса. Для расчета максимальной амплификации кинетической энергии и оптимальных возмущений был предложен оригинальный метод, за основу которого был взят метод из работы [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-31-60092).

ЛИТЕРАТУРА

1. Demyanko K. V., Nечepurenko Yu. M. *Linear stability analysis of Poiseuille flow in a rectangular duct*. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2013. V. 28. № 2. Pp. 125–148.
2. Kerswell R. R., Davey A. *On the linear instability of elliptic pipe flow*. J. Fluid Mech. 1996. V. 316. Pp. 307–324.
3. Бойко А. В., Нечепуренко Ю. М. *Численный спектральный анализ временной устойчивости в каналах постоянного сечения*. Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2008. Т. 48. № 10. С. 1–17.

СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННЫЕ ТЕЧЕНИЯ НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ

Д. С. Денисенко, Н. И. Макаренко

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Рассматриваются двумерные стационарные течения неоднородной несжимаемой жидкости в слое конечной глубины над неровным дном в поле силы тяжести. Предполагается, что сверху жидкость ограничена жесткой крышкой. Данный процесс описывается нелинейной краевой задачей для уравнения Дюбрей-Жакотен — Лонга [1] с граничными условиями непротекания на дне и крышке, и условием отсутствия возмущений вверх по потоку. Разрешимость данной краевой задачи ранее была установлена [2, 3] для достаточно больших чисел Фруда (то есть с большим запасом сверхкритичности). В настоящей работе доказана теорема существования решения во всем диапазоне сверхкритических чисел Фруда. С этой целью исходная нелинейная краевая задача сводится к эквивалентной операторной формулировке в специальных функциональных пространствах типа классов Харди. После выделения и обращения главной линейной части, решение сводится к применению принципа сжимающих отображений, использующего малость высоты препятствия по отношению к глубине слоя жидкости. Установлена аналитичность искомого решения по указанному параметру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yih C. S. *Stratified flows*. N.-Y.: Academic Press, 1980.

2. Krutitskii P. A. *Fast nonlinear stratified flow over an obstacle*. Appl. Math. Lett. 1996. V. 9. № 6. P. 41–46.
3. Krutitskii P. A. *Fast nonlinear stratified flow over several obstacles*. Int. Journ. Of nonlinear Mech. 1997. V. 32. № 3. P. 483–488.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В УПРУГОМ КАНАЛЕ, МОДЕЛИРУЮЩЕМ ПРЯМУЮ АРТЕРИЮ

Н. С. Денисенко^{1,3}, В. М. Кулик², А. А. Черевко¹, А. П. Чупахин¹

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

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Новосибирский государственный университет

Задача о течении крови в артериях является одной из основных для гемодинамики [1]. Ее важность связана прежде всего с различными заболеваниями сердечно-сосудистой системы человека. Изучение течения крови в живых системах связано с большими трудностями. Поэтому для разработки новых и совершенствования существующих методов исследования течения крови в артериях, переходят от живых систем к лабораторным моделям.

В работе представлены экспериментальные исследования течения вязкой жидкости в цилиндрических силиконовых моделях, моделирующих прямой участок артерии. Силиконовая модель представляет собой сплошной цилиндр длиной 200 мм, внешним диаметром 30 мм и внутренним диаметром 7.5 мм (характерный диаметр сонной артерии). Для экспериментального исследования изготовлено 4 силиконовые модели, 3 из них сделаны из силикона и имеют различные упругие свойства, четвертая выполнена из оргстекла. Модели подключаются при помощи соединительных трубок к программируемому насосу CompuFlow 1000 MR. Насос создает различные периодические течения. Измерения скорости и давления проводятся внутрисосудистым датчиком ComboWire (ННИИПК) [2].

Для математического описания экспериментальных исследований используются аналитические формулы выведенные Вомерсли [3]. Рассматривается два случая. Первый случай — течение жидкости в трубе с твердыми стенками. Во втором случае — учитывается влияние упругости стенок на течение в трубе.

В работе проведено экспериментальное исследование периодических течений вязкой жидкости в моделях с различными упругими свойствами. Проведено сравнение формул полученных Вомерсли с экспериментальными данными, показавшее их хорошую взаимную согласованность.

Измерения датчиком ComboWire поддержаны Российском фондом фундаментальных исследований (код проекта № 17-08-01736). Проектирование и изготовление упругих моделей поддержано Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (код проекта НШ-8146.2016.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Педли Т. *Гидродинамика крупных кровеносных сосудов: Пер. с англ* М.: Мир, 1983.

2. Denisenko N.S., Chupakhin A.P., Khe A.K. et. al. *Experimental measurements and visualisation of a viscous fluid flow in Y-branching modelling the common carotid artery bifurcation with MR and Doppler ultrasound velocimetry*. JPCS. 2016. V. 722.
3. Womersley J.R. *Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic-tube - I: linear approximation for long waves*. Phil. mag. 1955. № 46. 199 p.

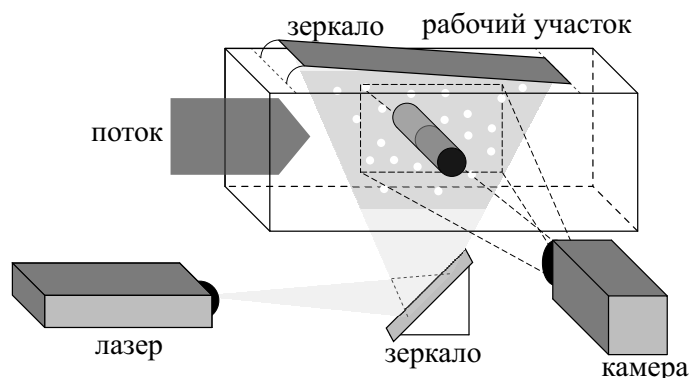
КАВИТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ В СЛЕДЕ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОГО ЦИЛИНДРА

К. Г. Добросельский

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

Поперечно-обтекаемые цилиндрические поверхности широко распространены в теплообменных, энергетических и теплотехнических устройствах. Условия обтекания и размеры вихревой зоны за телами важны для проектирования размещения как одиночных, так и групп обтекаемых элементов в технологических конструкциях. Кроме того, для построения и верификации современных математических моделей, описывающих возникновение и развитие кавитации, получение экспериментальной информации для различных режимов обтекания модельных объектов крайне важно.

В работе приводятся с использованием оптического метода PIV экспериментальные исследования поперечного обтекания стального цилиндра турбулентным потоком воды [1, 2] с числами Рейнольдса $Re = (2,53 \div 2,95) \cdot 10^5$ для кавитационных режимов. На рисунке приведена схема эксперимента; белые точки - трассеры. Перпендикулярно боковым стенкам прямоугольного канала располагался круглый цилиндр диаметром $d = 0,026$ м [2].



По осредненным (2000 двойных изображений) векторным полям скорости определены геометрические и кинематические параметры вихревых кавитационных структур в ближнем следе цилиндра. Показано, что при возрастании числа Рейнольдса длина обратного тока и расстояние между кавитационными вихревыми структурами за цилиндром имеют характерный минимум. При этом максимальные значения параметров отличаются от минимальных значений параметров примерно в полтора раза.

Исследование мгновенных картин обтекания цилиндра показало существование нескольких видов отрывных течений в ближнем следе, в том числе одновременного схода пары вихрей, хотя в среднем в течение длительного периода времени отрыв вихрей происходит квазипериодически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добросельский К. Г. *Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе*. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8. № 4. С. 110–117.
2. Добросельский К. Г. *Обтекание цилиндра в начале критической области*. ПМТФ. 2016. Т. 57. № 2. С. 117–123.

АСИМПТОТИКА РЕШЕНИЙ У ГОЛОВНОГО ФРОНТА ЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ–ПУАССОНА С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ В БАССЕЙНЕ С НЕРОВНЫМ ДНОМ

Доброхотов С. Ю.

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва
Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

Рассматривается задача Коши–Пуассона [1] с локализованными начальными данными для линейной теории поверхностных волн на воде в бассейне с неровным дном. Показано, что асимптотика решений таких задач описывается каноническим оператором Маслова на лагранжевых многообразиях с выколотой точкой и что передний фронт волн — это каустика специального типа, связанная с негладкостью дисперсионного соотношения для малых волновых чисел и так называемыми “нестандартными характеристиками” [2]. Также показано, что асимптотика решения в окрестности переднего фронта описывается гамильтоновой системой, соответствующей предельному волновому уравнению и коэффициентами, определяющим дисперсию в линеаризованном уравнении Буссинеска, приближающему изучаемые уравнения. Формулы для полученной асимптотики оказываются достаточно простыми, более эффективными по сравнению с формулами [3–5] и явно отражают влияние на головную волну разумных физических характеристик задачи: закона Грина, расходимости лучей, “накопленной дисперсии” и формы начального возмущения. Обсуждается вопрос о равномерности асимптотики решения по переходу от исчезающе малой к большой дисперсии. Для примера начального возмущения специального вида (типа распределения Коши в теории вероятностей) решение в окрестности головного фронта выражается через комбинацию произведений функций Эйри, что дает возможность эффективно анализировать влияние всех перечисленных выше факторов на волны в окрестности переднего фронта.

Работа выполнена совместно с В.Е.Назайкинским [6] при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект N 16-11-10282).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stoker J. J.. *Water Waves: The Mathematical Theory with Applications*. New York: John Wiley and Sons, 1958 (reprinted in 1992).
2. Маслов В. П. *Нестандартные характеристики в асимптотических задачах*. УМН. 1983. Т. 38. № 6, С. 3–36.
3. Доброхотов С. Ю., Жевандров П. Н., Кузьмина М. В. *Асимптотика решения задачи Коши–Пуассона в слое непостоянной толщины*. Мат. заметки. 1993. Т. 53. № 6, С. 141–145.

4. Berry M. V., *Tsunami asymptotics*. New J. of Phys. 2005. V. 7. № 129, Pp. 1–18.
5. Sekerzh-Zen'kovich S. Ya. *Comparison of solutions of a problem of Cauchy–Poisson type under discontinuous and smooth initial values with the marigrams of Tsunami 2011 obtained from DART stations*. Russ. J. Math. Phys. 2016. V. 23. № 4. Pp. 529–538.
6. Доброхотов С. Ю., Назайкинский В. Е. *Проколотые лагранжесвы многообразия и асимптотические решения линейных уравнений волн на воде с локализованными начальными условиями*. Мат. заметки. 2017. Т. 101. № 6 (в печати).

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ В ОКРЕСТНОСТИ ФОКАЛЬНЫХ ТОЧЕК ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЛН НА ВОДЕ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

С. Ю. Доброхотов, А. А. Толченников

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва
Московский физико–технический институт, Долгопрудный*

Рассматривается линейная система теории поверхностных волн на воде в бассейне с неровным дном. Для этой системы изучаются локализованные решения задачи Коши–Пуассона [1] с локализованными начальными условиями. В недавней работе С.Ю. Доброхотова и В.Е. Назайкинского [4] предложен основанный на модификации канонического оператора Маслова и нестандартных характеристиках [2] способ построения асимптотики решения этой задачи, приводящий к формулам более эффективным, чем формулы приведенные в работах [4–6]. В частности, показано, что кривая, описывающая передний фронт решения, — это каустика специального вида, часто имеющая (в зависимости от формы дна бассейна) точки поворота – “сильные фокальные”. Вне окрестностей точек поворота на переднем фронте в [3] построены эффективные асимптотические формулы, равномерные по изменению горизонтального размера источника (то есть по переходу от слабой к сильной дисперсии). В докладе приводятся формулы, описывающие волновое поле в окрестности указанных “точек поворота”, обсуждаются вопросы их компьютерной реализации, зависимости от дисперсионных эффектов, их связь с решением линеаризованного уравнения Буссинеска и лагранжесвыми сингулярностями (теорией катастроф).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16-11-10282).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stoker J. J.. *Water Waves: The Mathematical Theory with Applications*. New York: John Wiley and Sons, 1958 (reprinted in 1992).
2. Маслов В. П. *Нестандартные характеристики в асимптотических задачах*. УМН. 1983. Т. 38. № 6, С. 3–36.
3. Доброхотов С. Ю., Назайкинский В. Е. *Проколотые лагранжесвы многообразия и асимптотические решения линейных уравнений волн на воде с локализованными начальными условиями*. Мат. заметки. 2017. Т. 101. № 6 (в печати).
4. Доброхотов С. Ю., Жевандров П. Н., Кузьмина М. В. *Асимптотика решения задачи Коши–Пуассона в слое непостоянной толщины*. Мат. заметки. 1993. Т. 53. № 6, С. 141–145.

5. Berry M. V., *Tsunami asymptotics*. New J. of Phys. 2005. V. 7. № 129, С. 1–18.
6. Sekerzh-Zen'kovich S. Ya. *Comparison of solutions of a problem of Cauchy–Poisson type under discontinuous and smooth initial values with the marigrams of Tsunami 2011 obtained from DART stations*. Russ. J. Math. Phys. 2016. V. 23. № 4. Pp. 529–538.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТЕЛЕ ВРАЩЕНИЯ

А. В. Довгаль, Б. Ю. Занин, А. М. Сорокин

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

В аэродинамической трубе исследовано продольное обтекание тела вращения при малых дозвуковых скоростях потока. Изучались различные варианты обтекания модели, которые последовательно сменяли друг друга при увеличении ее угла атаки. Объектом исследований был процесс развития возмущений в пристенной зоне потока и переход от ламинарного течения к турбулентному. Для получения данных о структуре течения применялись визуализация масляной пленкой и термоанемометрический метод.

Установлено, что при монотонном изменении угла атаки тела вращения последовательно реализуются несколько режимов его обтекания. При нулевом угле атаки в центральной части модели в области неблагоприятного градиента давления формируется кольцевая область отрыва ламинарного пограничного слоя, так называемый “отрывной пузырь”; свойства устойчивости подобных течений хорошо известны из результатов исследований отрыва потока в плоских конфигурациях, см. монографию [1]. В этом случае ламинарно-турбулентный переход происходит в пределах отрывной зоны. Термоанемометрические результаты показали хорошее совпадение характеристик малых возмущений, развивающихся в осесимметричной области отрыва ламинарного потока и в плоских отрывных течениях несжимаемого газа.

При небольшом увеличении угла атаки от 0 до 4 градусов картина течения резко изменяется. Осесимметричная область отрыва разрушается, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в хвостовой части модели. Отрывная зона локализуется на наветренной (верхней) части тела вращения, а на его нижней подветренной стороне наблюдается присоединенный пограничный слой. Известные расчетные и экспериментальные результаты по устойчивости двумерных сдвиговых течений указывают на то, что отрыв ламинарного пограничного слоя является дестабилизирующим фактором и вызывает увеличение пространственных инкрементов и частот нарастающих колебаний. Этот вывод справедлив и для трехмерного течения на теле вращения. Настоящие эксперименты показали, что скорость усиления малых возмущений за линией отрыва многократно превышает их инкременты в присоединенном пограничном слое.

При дальнейшем увеличении угла атаки происходит срыв потока по всей длине тела вращения. Линии отрыва расположены на боковых сторонах модели, начиная от ее носика до хвостовой части. В этом режиме течения в структуре обтекания тела вращения доминируют крупномасштабные продольные вихри.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. *Возникновение турбулентности в пристенных течениях*. Новосибирск: Наука, 1999.

ЦИФРОВАЯ ФОТОУПРУГОСТЬ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО–РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛНОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

В. С. Долгих, Л. В. Степанова, В. А. Туркова

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

Одной из наиболее важных задач механики разрушения была и остается задача аккуратного описания поля напряжений у вершины трещины [1, 2], что связано с построением высших приближений в полном асимптотическом разложении М. Вильямса [3]. Вильямсом было впервые предложено многопараметрическое описание поля напряжений в окрестности вершины трещины в изотропном линейно упругом теле [3]. С этого времени решение, предложенное М. Вильямсом для задач линейной механики разрушения, стало классическим. Но, как показали исследования в этой области [1, 2], чаще всего в инженерных приложениях удерживалось только первое слагаемое полного асимптотического разложения М. Вильямса. В последние годы на основе проведенных теоретических исследований, натуральных экспериментов, а так же компьютерного имитационного моделирования сложилось четкое понимание необходимости удержания в полном асимптотическом разложении слагаемых более высокого порядка [1]. С помощью многопараметрического анализа поля напряжений, основанного на поляризационно-оптических методах механики деформируемого твердого тела (методе фотоупругости), в настоящей работе была проведена цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений, выполненных на серии образцов с трещинами и надрезами из оптически активных материалов. Были рассмотрены разные классы образцов из оптически чувствительных материалов: образец с двумя коллинеарными трещинами в условиях нормального отрыва и смешанного нагружения, образцы с двумя краевыми надрезами, полудиски с наклонными надрезами. С помощью основного закона фотоупругости вычислены коэффициенты полного асимптотического разложения М. Вильямса. Подготовлен комплекс программ, позволяющий найти масштабные множители высших порядков полного асимптотического разложения М. Вильямса поля напряжений у вершины трещины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00571).

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова Л. В., Росляков П. С. *Полное асимптотическое разложение М. Уильямса у вершин двух коллинеарных трещин конечной длины в бесконечной пластине*. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2015. № 4. С. 188–225.

2. Stepanova L. V., Igonin S. A. *Asymptotics of the near-crack-tip stress field of a growing fatigue crack in damage materials: Numerical experiment and analytical solution*. Numerical Analysis and Applications. 2015. V. 8. № 2. Pp. 168–181.
3. Williams M. L. *On the stress distribution at the base of a stationary crack*. Journal of Applied Mechanics. 1957. V. 24. P. 109–114.

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ БЫСТРОГО ЗАЖИГАНИЯ МИШИНЕЙ ИТИС

Г. В. Долголева¹, А. И. Зыкова²

¹Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, Москва

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

В докладе рассматривается численное конструирование мишеней тяжелоионного синтеза (ИТИС), который является одной из ветвей управляемого термоядерного синтеза (УТС). Одна из важных задач при конструировании мишеней для управляемого термоядерного синтеза состоит в подборе энерговложения, при котором можно получить “горение” (наличие термоядерных реакций) рабочей ДТ области. Работа посвящена быстрому зажиганию мишеней ИТИС с помощью дополнительного кратковременного вклада энергии в уже сжатое на порядок более длительным энерговложением вещество ДТ. Для лазерных мишеней эта проблема достаточно хорошо изучена. Для мишеней тяжелоионного синтеза эта проблема является новой.

Увеличение максимального импульса на современных установках ИТИС делать очень сложно (технически) и дорого, в данной работе показано, что дополнительное энерговложение (“поджигающий” импульс) уменьшает требования к максимальному импульсу. Цель работы — исследование влияния поджигающего импульса на параметры мишени ИТИС.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ НАПЫЛЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С КОМПОНЕНТАМИ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ

Д. В. Дудина, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев, Д. К. Рыбин

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

С использованием оборудования детонационного напыления Computer-Controlled Detonation Spraying CCDS2000 с возможностью гибкого изменения параметров процесса определены состав и структура покрытий, содержащих продукты взаимодействия напыляемых материалов с продуктами детонации и газом-носителем. Выявлены закономерности реакционного поведения титана, никеля, интерметаллидов Ti_3Al и $TiAl$, а также композитов $Ti_3SiC_2 - Cu$, $TiC_x - Ti$, $Ni - C_{am}$ и $Ti - Cu$ при детонационном напылении. В ходе структурных исследований установлено, что фазовый состав детонационных покрытий может быть существенно

изменен относительно фазового состава исходных порошков. Управление фазовым составом и структурой покрытий может осуществляться путем изменения соотношения O_2/C_2H_2 , объема взрывчатой смеси и природы газа-носителя. Выявлены возможные способы предотвращения или сведения к минимуму нежелательных химических реакций. Установлено, что в случае взаимодействия напыляемых материалов с компонентами газовой атмосферы характерными структурными элементами детонационных покрытий являются чередующиеся слои, различающиеся по составу. Данная микроструктура в случае керамических композитов является перспективной для достижения высокой трещиностойкости материала. Показано, что при формировании покрытий из двухкомпонентных смесей процессы фазо- и структурообразования зависят от структуры исходной порошковой смеси. Реакционное поведение компонентов и формирование структуры покрытий при напылении смеси порошков компонентов отличаются от наблюдаемых при напылении композиционного порошка, полученного механической обработкой компонентов в планетарной шаровой мельнице и состоящего из композиционных частиц (агломератов).

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЕКТРА ЛИНЕЙНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ

А. В. Егитов

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

В работе [1] доказана линейная неустойчивость аналога течения Пуазейля в классе достаточно произвольных возмущений для модифицированной базовой модели Виноградова – Покровского [2].

Заметим, что для вязкой жидкости (модель Навье – Стокса) гипотеза о линейной неустойчивости течения Пуазейля при больших числах Рейнольдса принадлежит W. Heisenberg [3], ее обоснование — А. Н. Крылову [4], а последние результаты — E. Grenier, Y. Guo, T. T. Nguyen [5].

В данной работе найдено асимптотическое представление собственных чисел линеаризованной проблемы (основное решение — экспериментально наблюдаемый аналог известного течения Пуазейля) при дополнительном предположении о периодичности малых возмущений относительно переменной, идущей вдоль стороны канала. Полученный результат важен при исследовании линейной устойчивости найденного стационарного решения в выбранном классе возмущений. Исследования в этом направлении начаты в работе [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин А. М., Егитов А. В., Ткачев Д. Л. *Линейная неустойчивость решений математической модели, описывающей течения полимеров в бесконечном канале*. ЖВМиМФ. 2015. Т. 55. № 5. С. 850–875.
2. Алтухов Ю. А., Гусев А. С., Пышнограй Г. В. *Введение в мезоскопическую теорию текучих полимерных систем*. Барнаул: Алт. ГПА, 2012.
3. Heisenberg W. *Über Stabilität und Turbulenz von Flüssigkeitsströmen*. Ann. Phys. 1924. V. 74. Pp. 577–627.

4. Крылов А. Н. *Об устойчивости течения Пуазейля в плоском канале*. ДАН СССР. 1964. Т. 158. № 5. С. 978–981.
5. Grenier E., Guo Y., Nguyen T.T. *Spectral instability of characteristic boundary layer flows*. Duke Math J. 2016. V. 165. № 16. Pp. 3085–3146.
6. Блохин А. М., Ткачев Д. Л. *Линейная асимптотическая неустойчивость стационарного течения полимерной среды в плоском канале в случае периодических возмущений*. Сиб. журн. инд. матем. 2014. Т. XVII. № 3. С. 12–25.

О ЗАДАЧЕ ВРАГОВА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА, НЕ РАЗРЕШЕННОГО ОТНОСИТЕЛЬНО СТАРШЕЙ ПРОИЗВОДНОЙ

И. Е. Егоров

*НИИ математики Северо-Восточного федерального университета имени
М. К. Аммосова, Якутск*

Уравнения с частными производными, не разрешенные относительно старшей производной, возникают при исследовании прикладных задач гидродинамики. В последние годы среди математиков и механиков появился интерес к изучению краевых задач для псевдопараболических и псевдогиперболических уравнений, а также для простых уравнений соболевского типа [1].

В настоящей работе рассмотрена краевая задача Врагова [2] для уравнения смешанного типа третьего порядка, не разрешенного относительно старшей производной. Уравнение в зависимости от коэффициента при второй производной по времени принадлежит псевдопараболическому или псевдогиперболическому типу. С помощью нестационарного метода Галеркина в сочетании с методом регуляризации установлена однозначная регулярная разрешимость задачи Врагова при определенных условиях на коэффициенты и правую часть уравнения. Для Галеркинских приближений получена оценка погрешности относительно точного решения задачи Врагова через параметр регуляризации и собственные значения спектральной задачи Дирихле для оператора Лапласа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания на выполнение НИР на 2017-2019 годы (код проекта 6069).

ЛИТЕРАТУРА

1. Демиденко Г. В., Успенский С. В. *Уравнения и системы, не разрешенные относительно старшей производной*. Новосибирск.: Научная книга, 1998.
2. Егоров И. Е., Тихонова И. М. *Модифицированный метод Галеркина для задачи Врагова*. Сибирские электронные математические известия. 2015. Т. 12. С. 144–154.

О ФРЕДГОЛЬМОВОСТИ ПЕРВОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА СО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРОМ

И. Е. Егоров, Е. С. Ефимова, И. М. Тихонова

*НИИ математики Северо-Восточного федерального университета имени
М. К. Аммосова, Якутск*

Фредгольмова разрешимость краевых задач для уравнений смешанного типа со спектральным параметром изучалась во многих работах [1–4]. В основном интересные результаты были получены для модельных уравнений смешанного типа со спектральным параметром на плоскости [1, 3]. Наиболее полную библиографию по данной теме можно найти в работах [1, 3, 5].

В данной работе исследуется первая краевая задача для уравнения смешанного типа второго порядка со спектральным параметром в многомерном случае.

При определенных условиях на коэффициенты уравнения получены априорные оценки, с помощью которых доказана однозначная разрешимость первой краевой задачи в энергетическом классе. Получены достаточные условия фредгольмовой разрешимости первой краевой задачи в энергетическом классе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-00430).

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеев Е. И. *Уравнения смешанного типа со спектральным параметром*. М.: Изд-во Московского университета, 1988.
2. Егоров И. Е., Федоров В. Е. *Неклассические уравнения математической физики высокого порядка*. Новосибирск: Изд-во ВЦ СО РАН, 1995.
3. Салахитдинов М. С., Уринов А. Н. *К спектральной теории уравнений смешанного типа*. Ташкент: Изд-во "MUMTOZ SO'Z", 2010.
4. Егоров И. Е., Захарова Т. И. *О фредгольмовости краевой задачи для уравнения смешанного типа*. Мат. заметки ЯГУ. 2013. Т. 20. № 1. С. 20–26.
5. Егоров И. Е. *О краевой задаче для уравнения смешанного типа со спектральным параметром*. Мат. заметки СВФУ. 2014. Т. 21. № 1. С. 11–17.

ДЕТОНАЦИЯ ПОРИСТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. П. Ершов¹, И. А. Рубцов², Э. Р. Прууэл¹

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

²Новосибирский государственный университет

Согласно теории Зельдовича – фон Неймана – Деринга (ЗНД) [1], детонация ведется ударной волной, за которой следуют зона химической реакции, звуковая поверхность Чепмена –

Жуге и, наконец, нестационарная волна расширения. Классическая простота и ясность теории ЗНД позволили ей занять ведущее место задолго до первых экспериментальных подтверждений.

Существуют, однако, системы, для которых модель ЗНД не выглядит заведомо подходящей. При низкой плотности ВВ ($0,2 - 0,8 \text{ г/см}^3$), достигаемой распределением частиц ВВ в пенопластовой матрице, детонация имеет конвективный механизм распространения, когда продукты реакции последовательно поджигают частицы ВВ [2]. Естественно, что при отсутствии прямого контакта частиц ударный механизм затруднен, и более эффективным становится струйный механизм А. Я. Апина [3].

При естественной насыпной плотности, когда частицы контактируют, но объем пор остается значительным (около 40 %), также имеется возможность распространения струй горячих продуктов. Данные А. Н. Дремина и др., полученные для таких плотностей в 60-х годах прошлого века [4], в общем укладывались в модель ЗНД. Однако доступное на то время разрешение (0,1 мкс) сейчас не выглядит достаточным, поскольку сравнимо со временами реакции в детонационной волне.

Ранее нами в [5] исследованы тэн, гексоген и октоген при насыпной плотности современным методом VISAR. В ряде случаев наблюдались резкие пульсации течения, не согласующиеся с концепцией ЗНД.

В данной работе те же ВВ исследованы электромагнитным методом с разрешением около 5 нс. Плечо датчика ($\approx 1 \text{ мм}$) было сравнимо с размером зерна ВВ (сотни мкм). В опытах наблюдался либо химпик, либо резкие колебания сигнала вокруг уровня Чепмена – Жуге, что указывает на неклассический механизм распространения детонации за счет фильтрации струй газа по порам (взрывное горение по А. Я. Апину). Не исключено, что детонация может переключаться с ударной на струйную моду и назад в одном и том же заряде.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-03-01039).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. *К теории распространения детонации в газообразных системах*. ЖЭТФ. 1940. Т. 10. № 5. С. 542–568.
2. Соловьев В. С. и др. *Экспериментальное исследование механизма возбуждения детонации в низкоплотных ВВ*. ФГВ. 1986. Т. 22. № 4. С. 88–92.
3. Апин А. Я. *О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ*. ДАН СССР. 1945. Т. 50. С. 285–288.
4. Дремин А. Н. и др. *Детонационные волны в конденсированных средах*. М.: Наука, 1970.
5. Ershov A. P. et al. *Nonideal detonation regimes in low density explosives*. Journ. Appl. Phys. 2016. V. 119. № 7. 075903.

ОПТИМИЗАЦИЯ “ГОРЯЧЕЙ” ПЕРЕКАЧКИ НЕФТЕСМЕСИ В МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ

У. К. Жапбасбаев, Т. Т. Бекибаев, Г. И. Рамазанова

Казахстанско-Британский технический университет, Алматы

В исследованиях по перекачке нефти с подогревом в качестве критерия оптимальности принято считать минимум стоимости общих эксплуатационных затрат на перекачку и подогрев и целевая функция определяется в виде [1]:

$$S = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \frac{\sigma_H}{\eta_H} + \rho \cdot Q \cdot c_p \cdot (T_n - T_k) \frac{\sigma_\theta}{\eta_\theta} \Rightarrow \min \quad (1)$$

где S — стоимость суммарных затрат, Q — объемный расход, g — ускорение свободного падения, H — полные потери напора на участке, ρ , c_p — плотность и теплоемкость нефти, σ_H , σ_θ — стоимости единицы механической и тепловой энергии, η_H , η_θ — КПД насосных агрегатов и пункта подогрева, T_n , T_k — начальная и конечная температура нефти на участке.

Впервые решение этой задачи было получено В.С. Яблонским [2]. Согласно этому решению температура подогрева будет оптимальной в том случае, когда стоимость суммарных затрат на перекачку и подогрев на единице длины в начале участка равна стоимости суммарных затрат на перекачку и подогрев на единице длины в конце участка нефтепровода. Критерий оптимальности В.С. Яблонского сформулирован для фиксированного расхода на линейном участке, и не выполняется при изменении объема перекачки и регулировании температуры нефтесмеси на участках с несколькими насосными станциями и пунктами подогрева.

Известно, что 70-85 % потребляемой энергии при “горячей” перекачке затрачивается на работу насосов и печей подогрева. Поэтому критерии оптимальности энергосберегающего режима перекачки нефтесмеси предлагается в виде минимального значения суммарной стоимости потребляемой мощности насосных агрегатов и печей подогрева:

$$\sum_{i=1}^n \left(z_i^{\text{эл}} \sum_{j=1}^{m_i^{\text{нас}}} c_{ij}^{\text{нас}} N_{ij}^{\text{НА}}(\mathbf{k}_{ij}) + z_i^{\text{топ}} \sum_{j=1}^{m_i^{\text{пч}}} g_{ij}^{\text{пч}} Q_{ij}^{\text{топ}} \right) \rightarrow \min \quad (2)$$

где n — число перекачивающих станций, $m_i^{\text{нас}}/m_i^{\text{пч}}$ — количество насосов/печей в i -ой станции, $z_i^{\text{эл}}/z_i^{\text{топ}}$ — стоимость электроэнергии (тенге/(кВт · ч))/топлива (тенге/кг) на i -ой станции; $c_{ij}^{\text{нас}}/g_{ij}^{\text{пч}}$ — целочисленная переменная, которая имеет значение 1 если насос/печь в работе, и 0 в противном случае; $Q_{ij}^{\text{топ}}$ — скорость подачи топлива на j -ую печь i -ой станции (кг/ч).

Оптимизационные расчеты проводятся с использованием критерия (2), были определены энергосберегающие режимы транспортировки нефтесмесей на участках магистрального нефтепровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапки В. М., Кривошеин Б. Л., Юфин М. *Тепловые и гидродинамические расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов*. М.: Недра, 1981.
2. Яблонский В. В., Новоселов В. Ф., Галеев В. В., Закиров Г. З. *Проектирование, эксплуатация и ремонт нефтепродуктопроводов*. М.: Недра, 1965.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НЕСВОБОДНОЙ СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ ЛАГРАНЖА ПЕРВОГО РОДА

А. Р. Загидулин^{1,2}, Е. Г. Подружин¹, Г. И. Расторгуев¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

²Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина,
Новосибирск

Предложена методика моделирования движения несвободной системы твердых тел (взаимное положение тел ограничивается накладываемыми голономными связями) с использованием уравнений движения Лагранжа первого рода. Традиционно для решения подобных задач использовались уравнения Лагранжа второго рода в обобщенных координатах, что позволяло снизить размерность решаемой системы уравнений. Основным недостатком такого подхода являлся тот факт, что в зависимости от выбора обобщенных координат изменялся вид решаемой системы, т. е. собственно уравнения определялись индивидуальным подходом к решаемой задаче. В случае изменения (усложнения) системы тел приходилось получать заново разрешающие уравнения. Моделирование же с помощью предлагаемого подхода позволяет представить модель системы в объектном виде — как совокупность объектов: твердых тел, силовых факторов и механических связей, что обеспечивает модульность и расширяемость модели. Что в свою очередь позволяет автоматизировать процесс построения модели [1, 2].

В работе предложенная методика использовалась для моделирования процессов обжатия амортизационных стоек шасси летательных аппаратов. В частности, были проведены расчеты на работоспособность амортизационных стоек при проведении копровых испытаний стоек шасси конкретных летательных аппаратов в СибНИА им. С. А. Чаплыгина (самолеты Ту-204СМ, МС-21, вертолет Ка-62). При сравнении с результатами измерений основных параметров, проведенных при испытаниях, была подтверждена высокая точность аналитических расчетов, полученных с использованием модели.

ЛИТЕРАТУРА

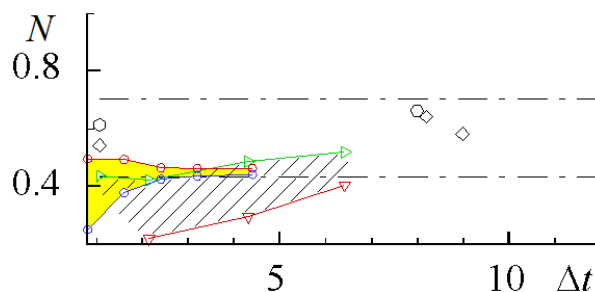
1. Гантмахер Ф. Р. *Лекции по аналитической механике*. М.: Наука, 1966.
2. Lotstedt P. *Mechanical Systems of Rigid Bodies Subject to Unilateral Constraints*. SIAM Journal on Applied Mathematics. 1982. V. 42. № 2. Pp. 281–296.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ОКОЛОЗВУКОВОЙ ОБЛАСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПРИ ПОДВОДЕ ЭНЕРГИИ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

В. П. Замураев, А. П. Калинина

*ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

Одним из способов снижения потерь полного давления в высокоскоростных ПВРД является предварительное торможение потока до околозвуковых скоростей [1]. В предлагаемой работе на основе нестационарных уравнений Эйлера численно исследовано течение в осесимметричном канале, по размерам подобно экспериментальному [1]. В секции постоянного сечения осуществляется пристеночный импульсно-периодический подвод энергии и инжектируется кольцевая струя при давлении в газогенераторе $p = 2$ атм. Варьировались мощность и размеры зоны энергоподвода. В [2] получена диаграмма околозвуковых областей для плоского канала, здесь же исследован осесимметричный случай. На рисунке изображена диаграмма “нормированная мощность N ” – “период Δt ”. Период Δt нормирован на отношение входного диаметра к скорости звука на входе в канал, мощность N нормирована на произведение $3\rho a^3 S$, где S — поперечная площадь секции постоянного сечения, ρ и a — плотность и скорость звука на входе в канал.



Штрихпунктирные линии ограничивают предельные значения мощности для случая с пристеночными источниками без струи, когда происходит переход на режим с запираем. Ромбы дают численное решение без запираения, кружки — с запираем. Затрихованная область соответствует околозвуковой области при совместном действии струи и пристеночных источников для плоского канала, окрашенная — для осесимметричного. Сравнительно большая ширина этих областей свидетельствует о возможности устойчивого процесса и является положительным аргументом к обоснованию способа запуска процесса горения в камере сгорания в [1].

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН III.22.6.2. (№ 01201351870) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00183).

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков П. К., Забайкин В. А., Прохоров А. Н. *Высокоскоростной ПВРД с пульсирующим режимом запуска*. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теор. и прикл. мех. Казань: Изд.-во Казанского ун-та. 2015. С. 3778–3780.

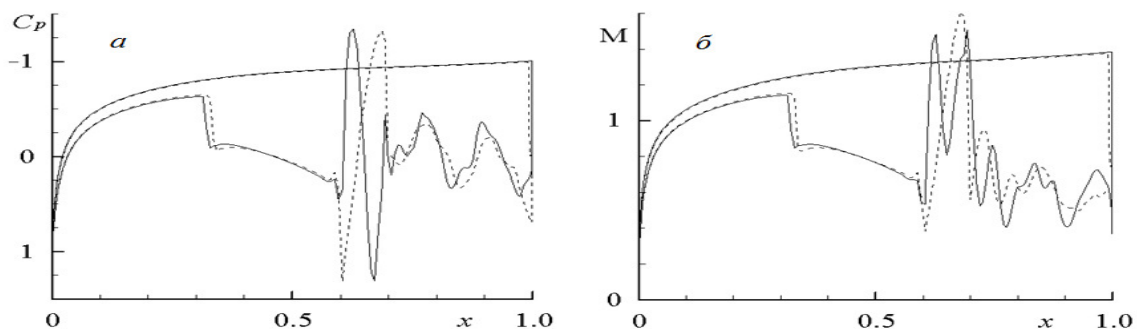
2. Замураев В. П., Калинина А. П. *О возможности создания устойчивой околосзвуковой области в сверхзвуковом потоке в канале*. Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 7. С. 292–296.

ТРАНСЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ДВУХМОДОВОМ ОДНОСТОРОННЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В. П. Замураев, А. П. Калинина

*ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

Колебания поверхности при трансзвуковом обтекании рассматриваются обычно в связи изучением бафтинга или флаттера. При изучении этих явлений моделируется начало развития процесса в течение нескольких периодов, но не рассматривается влияние на аэродинамические характеристики. В данной работе проводится параметрическое исследование влияния на аэродинамические характеристики вынужденных колебаний участка профиля, не вызывающих ни бафтинга, ни флаттера. В [1] показано, что при определенном выборе параметров одномодовых вибраций в форме стоячей волны можно получить улучшение аэродинамических характеристик. Зависимость аэродинамических характеристик от периода немонотонна. Поэтому возникает вопрос, как будет влиять на обтекание двухмодовое силовое воздействие той же средней мощности, что и одномодовое. Значения частот отличаются в два раза. Оба колебания представляют собой стоячие волны с одинаковым энергетическим вкладом и соответствуют монотонному участку зависимости аэродинамических характеристик от периода. На рисунке представлено сравнение коэффициента давления (а) и числа Маха (б) для одно- и двухмодового колебаний одинаковой мощности (штриховая и сплошная линия соответственно) для нулевой фазы.



Положения ударных волн практически совпадают. Отличия в аэродинамических характеристиках незначительны и не превышают 5%. Таким образом, воздействие двухмодового колебания на трансзвуковое обтекание крылового профиля определяется суммарной мощностью, если обе частоты соответствуют монотонному участку зависимости аэродинамических характеристик от частоты, и существенно зависят от значений составляющих частот в противном случае.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН III.22.6.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zamuraev V. and Kalinina A. *The impact of unilateral vibrations on aerodynamic characteristics of airfoils in transonic flow*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.722. 012018 doi:10.1088/1742-6596/722/1/012018

ОСОБЕННОСТИ СХЛОПЫВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ ОБЛИЦОВКИ С УЧЕТОМ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ

О. В. Зарубина, В. Д. Баскаков, К. А. Карнаухов, В. В. Кореньков

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Цель работы — разработка модельных представлений о формировании кумулятивных струй из облицовок с нарушениями осевой симметрии, обусловленными технологическими погрешностями.

Разнотолщинность облицовки в поперечном сечении представлялась суммой тригонометрических гармоник ряда Фурье [1]. Для гармонической составляющей разнотолщинности, моделирующей несоосность наружной и внутренней поверхностей облицовки, разработаны зависимости для оценки угла отклонения кумулятивной струи от оси симметрии. Зависимости основаны на допущении о том, что массы формируемых при обжати струй не зависят от величины несоосности [2].

Для оценки искажения формы поперечного сечения облицовки при схлопывании проведены численные расчеты в пакете ANSYS AUTODYN процесса обжатия колец с изменениями толщины в соответствии с гармоническими составляющими разнотолщинности. Установлено, что внутренний контур сечения таких колец в процессе обжатия искажается, а характер искажения зависит от номера гармоники. Подобные искажения могут переноситься на кумулятивную струю и снижать ее предельное удлинение в осевом направлении. Показано, что при больших значениях амплитуд гармоник внутренний контур искажается столь значительно, что обеспечивает образование нескольких центров формирования кумулятивной струи.

Численные расчеты показали, что при равных значениях амплитуды наибольшее искажение внутреннего контура кольца обеспечивает гармоника $n=2$ тригонометрического ряда. Также установлено, что прочность и плотность материала облицовки практически не влияют на величину искажения формы поперечного сечения струи.

Полученные результаты можно использовать при проведении количественных оценок влияния геометрических погрешностей облицовок на кинематические и геометрические параметры кумулятивной струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов В. А., Баскаков В. Д., Дубовской М. А. *Влияние технологической наследственности на пробивное действие кумулятивных зарядов*. Оборон. техника. 1995. № 4. С. 54–59.
2. Баскаков В. Д., Зарубина О. В., Карнаухов К. А., Тарасов В. А. *Математическое моделирование процесса соударения плоских струй идеальной жидкости*. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана Серия: Естественные науки. 2016. № 2 (65). С. 79–90.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОВ В ПОМЕЩЕНИЯХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Ю. В. Захарова, Н. Н. Федорова, А. В. Федоров

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

Возникновение аварийных ситуаций внутри объектов различного назначения часто связано с неправильной их эксплуатацией, а также с не соблюдением норм безопасности. Аварии на промышленных объектах и в зданиях жилой застройки могут приводить к образованию газопарового облака и последующему взрывному горению. При этом избыточное давление и импульс должны лежать в диапазоне значений, не превышающих несущую способность конструкции. Для снижения избыточного давления до безопасного уровня в помещениях рекомендовано использовать оконные проемы и легко сбрасываемые конструкции. Численное моделирование вышеуказанных процессов позволяет предсказать условия возникновения взрывоопасного облака, оценить последствия взрывного воздействия, а также разработать меры по минимизации ущерба.

В данной работе представлены результаты исследования взрыва заряда TNT, расположенного внутри помещения. Исследовано влияние массы взрывчатого вещества (ВВ), а также конфигурации помещения на картину возникающего течения продуктов детонации и воздуха. Моделирование проведено в программной среде ANSYS Workbench с использованием модулей AUTODYN и Fluent.

На первом этапе был проведен расчет взрыва заряда TNT, массой 0.5 кг, расположенного в центре помещения кубической формы. На крыше помещения имелось круглое вентиляционное отверстие. Величины давлений, действующих на стенку помещения, измерялись в нескольких контрольных точках, расположенных на одной из стенок.

Полученные расчетные данные были сопоставлены с экспериментальными результатами по времени прихода ударной волны в контрольные точки и величине первого пика давления. В целом результаты расчета вполне удовлетворительно предсказывают экспериментальные данные.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-07-06581 а и 17-08-01158 а) и Российского научного фонда (код проекта 16-19-00010).

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

К. В. Захарченко^{1,2}, А. В. Таланин³, Е. А. Максимовский⁴

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

²Новосибирский государственный технический университет

³ООО “Научно-технологическая инициатива”, Новосибирск

⁴Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

Одно из современных требований, предъявляемое к изделиям авиа- и машиностроения — защита металлических деталей от воздействия внешней среды, которая не ухудшает характеристики выносливости материала. А также возможность сформировать металлическое покрытие на поверхности сложной геометрической формы, которое будет иметь высокие механические свойства. Современные тенденции в развитии и совершенствовании сверхзвуковых газотермических методов [1] направлены на уменьшение температуры и увеличение скорости напыляемых частиц [2]. Оригинальное технологическое решение, в котором основным источником энергии при формировании покрытия, является кинетическая энергия, получаемая за счет центробежного ускорения частиц в вакууме [3] — холодное динамическое напыление (ХДН).

На примере двух покрытий из технически чистого алюминия, полученных способом плакирования и способом холодного динамического напыления, представлен сравнительный анализ деформационных характеристик. Особое внимание уделено методической части работы, связанной с подготовкой поверхности рабочей части образцов и контролем толщины сформированного покрытия методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) поперечного шлифа.

Экспериментально выявлено, что технология холодного динамического напыления позволяет создать покрытие, не ухудшающее деформационные характеристики материала при периодическом нагружении, что не позволяет технология плакирования, снижающая эти характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fukumoto M. *The Current Status of Thermal Spraying in Asia*. Journal of Thermal Spray Technology. 2008. V. 17(1). Pp. 5–13.
2. Xiao-Tao Luo, Cheng-Xin Li, Fu-Lin Shang, Guan-Jun Yang. *High velocity impact induced microstructure evolution during deposition of cold spray coatings: A review*. Surface and Coatings Technology. 2014. V. 254. Pp. 11–20.
3. Зубков В. И., Зубков В. П. *Способ и устройство для нанесения покрытий*. Патент №2369445. Россия. В05С7/08, В05D7/22. 2009.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВНОГО СИНТЕЗА

С. А. Зелепугин^{1,2}, О. В. Иванова¹, А. С. Зелепугин^{1,2}, А. С. Юношев³

¹Томский научный центр СО РАН

²Томский государственный университет

³Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В настоящее время несомненный интерес вызывают процессы, связанные с механическими и физико-химическими превращениями, происходящие при прохождении ударных волн в металлах, минералах, полимерах и других твердых телах. Синтез новых материалов в соответствии с равновесными фазовыми диаграммами практически себя исчерпал. Перспективы связаны с получением метастабильных соединений в неравновесных условиях, для управляемого создания которых взрывное нагружение предоставляет большие возможности.

В работе на основе математической модели многокомпонентной среды исследовано воздействие ударных волн на процессы твердофазного синтеза в смесях алюминий–сера и алюминий–фторопласт, помещенных в цилиндрические ампулы.

Анализ численных и экспериментальных результатов позволил предположить следующую динамику распространения ударных волн при развитии твердофазного синтеза в цилиндрических ампулах сохранения, подвергаемых взрывному нагружению. При распространении проходящей ударной волны вдоль образца в наполнителе инициируется экзотермическая реакция. Проходящая ударная волна, отражаясь от нижней крышки ампулы в виде волны сжатия, встречается в нижней части ампулы с ударной волной, распространяющейся в наполнителе, что приводит к резкому повышению давления и скорости химических превращений в нижней части смеси. Высокая скорость тепловыделения в ходе химической реакции в нижней части ампулы, а также резкий рост давлений приводят к образованию газовой фазы, что может привести к полному или частичному разрушению ампул.

Проведенные исследования выявили проблему, связанную с разрушением ампул в условиях взрывного нагружения, что настоятельно требует проведения дальнейших исследований для решения данной проблемы.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРАМИК В ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

С. А. Зелепугин^{1,2}, М. Ю. Орлов², В. Ф. Толкачев³

¹Томский научный центр СО РАН

²Томский государственный университет

³НИИ прикладной математики и механики ТГУ, Томск

В качестве элементов конструктивно-компоновочных схем защитных конструкций против ударников кинетического действия используются различные виды сплавов и композиционных материалов комбинированного строения с усиленными прочностными характеристиками.

При отборе наиболее эффективных керамик и композитов для элементов конструкций из имеющих и вновь разрабатываемых материалов возникает задача сравнения их противоударной стойкости при варьировании условий высокоскоростного удара. Наиболее приемлемым по достоверности методом оценки эффективности является экспериментальное, численное и физическое моделирование процесса проникания ударников в конструкции, содержащие слои из металлических сплавов, керамик и композитов.

В работе представлены результаты инженерной оценки эффективности применения композиционных материалов комбинированного строения (керамик карбида бора, оксида и никелид алюминия) в качестве дополнительной защиты стальных и алюминиевых преград при ударе вольфрамовыми ударниками в диапазоне скоростей 1...5 км/с. Проведено физическое моделирование процесса взаимодействия ударника с преградой при высокоскоростном взаимодействии. Оценка глубины проникания ударников проведена по имитационной модели, разработанной на базе гидродинамической модели бронепробивания. Выявлены основные характеристики керамик для эффективного использования в качестве дополнительных элементов защиты, расположенных на лицевой поверхности конструкции.

УДАРНОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Б. С. Злобин, А. А. Штерцер, В. В. Киселев, С. Д. Шемелин

*Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) относится к частично кристаллическим полимерам. Он обладает уникальными физико-механическими характеристиками и поэтому находит все большее применение в современном машиностроении. С ростом температуры при нормальном давлении СВМПЭ не переходит в вязкотекучее состояние вплоть до расплавления [1]. Из-за огромной молярной массы (миллионы г/моль) СВМПЭ обладает высокой вязкостью расплава, что затрудняет его обработку давлением. Основное производство объемного материала из порошков СВМПЭ основано на методе горячего прессования, который отличается дорогостоящим оборудованием, большой длительностью технологического цикла и высокой энергоемкостью. Поэтому актуальной является задача отыскания альтернативных, более дешевых способов получения объемного материала и изделий из СВМПЭ. В КТФ ИГиЛ СО РАН с этой целью разрабатывается метод циклического ударного прессования, по-видимому, впервые опробованный авторами [2]. Получены объемные образцы из порошка СВМПЭ марки GUR 4150 с молярной массой $9.2 \cdot 10^6$ г/моль. Одна из особенностей способа заключается в том, что в процессе обработки материал остается в твердофазном состоянии, вследствие чего в компакте сохраняется объемная доля кристаллической фазы до 66%. По прочностным свойствам образцы не уступают изделиям, производимым промышленным методом горячего прессования. Прочность получаемого материала на разрыв достигает 45,3 МПа при относительном удлинении 370% [3]. Показана возможность получения данным способом компактов с микро- и наноразмерными добавками (СВМП, модифицированный наполнителями TiO_2 , SiO_2 , SiC). Их прочность на разрыв составляет 23,1 - 27,7 МПа, относительное удлинение 250 - 300%. Циклическое ударное прессование представляется эффективным в изготовлении деталей небольших размеров с минимальной последующей механической обработкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селютин Г. Е., Гаврилов Ю. Ю., Воскресенская Е. Н., Захаров В. А., Никитин В. Е., Полу- бояров В. А. *Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэти- лена: свойства, перспективы использования*. Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18, № 3. С. 375–388.
2. Jauffres D., Lame O., Vigier G., Dore F. *Microstructural origin of physical and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction*. Polymer. 2007. V. 48. Issue 21. Pp. 6374–6383.
3. Злобин Б. С., Штерцер А. А., Киселев В. В. и др. *Циклическое ударное прессование сверх- высокомолекулярного полиэтилена*. ПМТФ. 2017 (принято к публикации).

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОКОЗАНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. Н. Зубарева, В. А. Сосиков, А. В. Уткин

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

Работа посвящена изучению ударно-волновых свойств докозана — предельного углево- дорода $C_{22}H_{46}$. Начальная плотность вещества равняется 0.94 г/см^3 . Скорость звука, изме- ренная на ультразвуковой установке, равна $C_{10} = 2.6 \pm 0.01 \text{ км/с}$. При нормальных условиях докозан, по своим физико-химическим свойствам подобен парафину, который представляет собой смесь углеводородов от C_{18} до C_{35} .

Для исследования использовались генератор ударных волн малой амплитуды, “традици- онный” взрывной генератор плоских ударных волн и модификации на его основе. Амплитуда импульсов сжатия изменялась от 0.2 до 10 ГПа. Профили массовой скорости измерялись ла- зерным доплеровским интерферометром VISAR. В каждом опыте дополнительно измерялась скорость ударной волны в образце. С этой целью на границе экран/образец помещался дат- чик, который фиксировал момент входа ударной волны в образец. Момент выхода ударной волны из образца определялся по сигналу интерферометра.

В отличие от парафина, докозан обладает рядом свойств, которые приводят к возник- новению некоторых особенностей структуры импульса сжатия при давлении ниже 100 МПа. Во-первых, формируется двухволновая конфигурация, обусловленная его упругопластиче- скими свойствами, т.е. первая волна является упругим предвестником. Во-вторых, докозан обладает аномальной сжимаемостью, что делает невозможным формирование ударных волн сжатия и фронт импульса расплывается по мере распространения по образцу.

В результате обработки экспериментальных результатов получена ударная адиабата и изэнтропа докозана при низких давлениях, которая имеет отрицательную кривизну.

Постановка экспериментов по регистрации профилей скорости свободной поверхности поз- волила также исследовать величину откольной прочности и показать отсутствие ее зависи- мости от скорости деформирования. Порог начала разрушения исследуемого материала до- статочно низкий, и величина откольной прочности не превышает 25 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных ис- следований (код проекта 16-38-00474).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ КАПЛИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Н. А. Зюзина¹, В. В. Остапенко^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

Для моделирования процесса стекания тонкой пленки жидкости по вертикальной стенке с учетом тепломассопереноса на межфазной поверхности было предложено неоднородное гиперболическое уравнение специального вида [1]. Были получены точные и численные решения этого уравнения [2], [3] описывающие эволюцию катящихся волн на поверхности стекающей пленки. На основе модели, разработанной в [1]– [3], проведено исследование бегущих волн на поверхности стекающей пленки жидкости с учетом тепломассопереноса и сил поверхностного натяжения [4].

В настоящей работе результаты, полученные в [1]– [4], использованы для построения математической модели, описывающей процесс растекания капли на горизонтальной плоскости с учетом тепломассопереноса и сил поверхностного натяжения. Для численного моделирования этого течения в полярных координатах разработана безусловна устойчивая неявная разностная схема, позволяющая в случае испарения методом сквозного счета, т.е. без специального выделения границы капли, моделировать ее растекание по сухой поверхности. Выделена область безразмерных параметров, при которых испаряющаяся капля в результате действия сил поверхностного натяжения перед полным испарением преобразуется в круговое кольцо.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10025).

ЛИТЕРАТУРА

1. Nakoryakov V. E., Ostapenko V. V., Bartashevich M. V. *Heat and mass transfer in the liquid film on a vertical wall in roll-wave regime*. Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. Pp. 6514–6518.
2. Накоряков В. Е., Остапенко В. В., Барташевич М. В. *Исследование катящихся волн на поверхности стекающей пленки конденсата*. ДАН. 2014. Т. 454. № 5. С. 540–544.
3. Nakoryakov V. E., Ostapenko V. V., Bartashevich M. V. *Rolling waves on the surface of a thin layer of viscous liquid at phase transition*. Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 89. Pp. 846–855.
4. Frolovskaya O. A., Pukhnachev V. V. *Traveling waves and structures in the Nakoryakov-Ostapenko-Bartashevich model of film flow with phase transitions*. Abstr. of Int. Sympos. and School for Young Scient. Interfacial phenomena and heat transfer. Novosibirsk. Russia, 2-4 March 2016. P. 69.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДАТЛИВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТРЕНИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

О. О. Иванов¹, В. В. Веденеев¹, В. М. Кулик², А. В. Бойко³

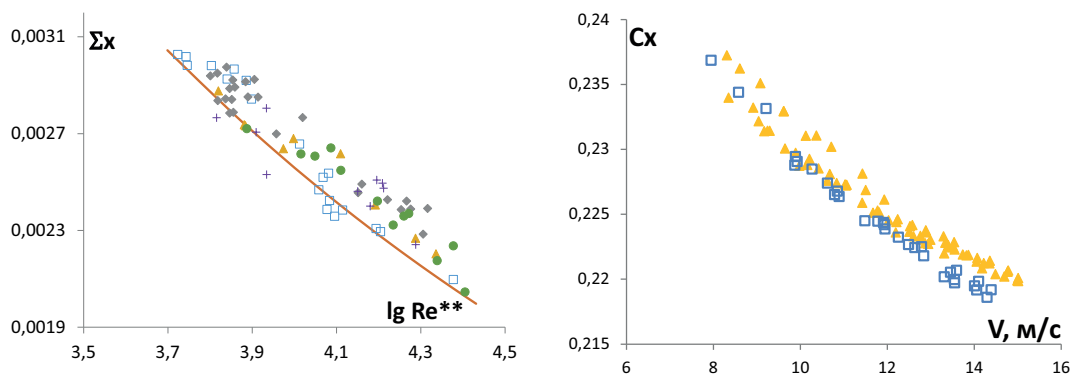
¹Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

В работе проведено исследование влияния однослойных вязкоупругих покрытий на снижение локального трения и общего сопротивления тестовой модели в гидродинамической трубе НИИ механики МГУ в диапазоне скоростей 5–15 м/с, причем параметры покрытий были измерены по методике [1]. Была изготовлена специальная модель с четырьмя сменными пластинами, в качестве которых использовались металлические и с покрытием из силиконовой резины толщиной 4, 6, 8, 10 мм.

Для силы сопротивления модели $F = C_x \rho V_\infty^2 S$ (S — площадь миделевого сечения) обнаружено, что покрытия увеличивают сопротивление, но не более чем на 6.5%. Коэффициент локального трения Σ_x , измеренный косвенным методом, показывал слабое (0–4%) увеличение трения для покрытий.



Слева — сравнение коэффициентов Σ_x для металлической пластины (полые квадраты) и для покрытий толщиной 4 (треугольники), 6 (круги), 8 (ромбы), 10 (кресты) мм. Сплошная линия — зависимость $\Sigma_x = 0.256(Re^{**})^{-1/4}$, $Re^{**} = \delta^{**} V_\infty / \nu$ (δ^{**} — толщина потери импульса). Справа — зависимость C_x от V_∞ для покрытия толщиной 4 мм (треугольники) и металлической пластины (квадраты).

Результаты проведенных экспериментов сравниваются с работами других авторов, где фиксировались свойства податливых покрытий, а также обсуждаются с точки зрения критерия оптимальных податливых покрытий [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Boiko A. V., Kulik V. M., Seoudi B. M., Chun H. H., Lee I. *Measurement method of complex viscoelastic material properties*. International Journal of Solids and Structures. 2010. V. 47(3). Pp. 374–382.
2. Kulik V. M., Lee I., Chun H. H. *Wave properties of coating for skin friction reduction*. Physics of Fluids. 2008. V. 20(7). 075109.

ОБ УСЛОВИЯХ СТРАГИВАНИЯ И ОТРЫВА С ПОДЛОЖКИ ЧАСТИЦЫ СДВИГОВЫМ ПОТОКОМ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

Я. С. Игнатенко¹, О. Б. Бочаров¹, Р. Мей²

¹Новосибирский Технологический Центр компании Бейкер Хьюз, Новосибирск

²Baker Hughes Inteq GmbH, Celle, Germany

Одной из основных проблем горизонтального бурения являются наносы, возникающие при осаждении переносимых частиц разбуренной породы. Чрезмерное образование осадка приводит к блокировке канала и остановке бурения. Для улучшения выноса частиц применяются буровые растворы с неньютоновскими характеристиками вязкости. Устойчивость бурового процесса достигается условиями, при которых наносы не будут образовываться либо их образование будет ограничено.

Условия начала движения и отрыва частицы определяются равновесием сил и моментов сил, для определения которых необходимо решить гидродинамическую задачу. Задача в полной постановке с учетом подложки весьма сложна и чаще всего ее сводят к обтеканию сферы находящейся на плоскости в сдвиговом потоке жидкости.

Голдман и др. [1] одними из первых рассмотрели задачу о взаимодействии сферы с плоской стенкой. Полученное ими решение в приближении Стокса дало оценку сил и моментов, действующих на сферу возле стенки. Ли и др. в работе [2] численно исследовали свободное качение с проскальзыванием сферической частицы по плоской поверхности. В одной из последних работ Ли и Балачандар [3] рассматривают обтекание частицы турбулентным сдвиговым потоком, находят критерий начала движения частицы по подложке и условие вовлечения частицы в поток. Таким образом, данную задачу для ньютоновской среды можно считать решенной.

В данной работе приводится численное моделирование ламинарного стационарного обтекания покоящейся и движущейся свободно сферы вблизи стенки в потоке неньютоновской псевдопластической жидкости с предельным напряжением типа Хершеля-Балкли. Из баланса сил и моментов сил определяется критическое напряжение на стенке (критерий Шилдса) для начала движения частицы и ее отрыва от подложки. Отклонение параметров жидкости от ньютоновских приводит к падению силы сопротивления, подъемной силы и момента сил. Таким образом, критическое напряжение на стенке всегда больше для рассматриваемого типа неньютоновской жидкости по сравнению с ньютоновской жидкостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goldman A. J., Cox R. G. and Brennen H. *Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall – II Couette flow*. Chemical Engineering Science. 1967. V. 22. № 4. Pp. 653–660.
2. Lee H. and Balachandar S. *Rolling/sliding of a particle on a flat wall in a linear shear flow at finite Re*. International Journal of Multiphase Flow. 2011. V. 37. Pp. 108–124.
3. Lee H. and Balachandar S. *Critical shear stress for incipient motion of a particle*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2012. V. 117. Pp. 1–19.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

С. В. Исаенков^{1,2}, М. В. Черданцев¹, А. В. Черданцев^{1,2}, Д. М. Маркович^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет*

Дисперсно-кольцевой режим течения реализуется при подаче в канал газожидкостной смеси с высоким содержанием газовой фазы, жидкость формирует пленку на стенках канала; поверхность пленки обдувается высокоскоростным потоком газа. При высоких расходах жидкости и газа на поверхности пленки формируются быстрые крупномасштабные волны возмущения, генерирующие мелкомасштабные волны ряби. Наличие волн возмущения необходимо для отрыва капель жидкости с поверхности пленки и уноса капель в ядро газового потока. Наличие волн и унос жидкости в дисперсную фазу оказывают существенное влияние на перепад давления и тепломассообмен в потоке. Моделирование такого течения требует понимания механизма формирования волн возмущения. Такая информация может быть получена экспериментально посредством проведения полевых измерений толщины пленки жидкости с высокой частотой опроса вблизи области формирования пленки. В данной работе такие эксперименты проводились при помощи метода лазерно-индуцированной флюоресценции в каналах круглого и прямоугольного сечения в восходящем и опускном течении. Эксперименты проводились в адиабатическом водо-воздушном течении в диапазоне среднерасходных скоростей газа 14-60 м/с и чисел Рейнольдса жидкости 140-400. В ходе эксперимента восстанавливались мгновенные поля толщины пленки жидкости в области размером 80 мм * 11 мм в цилиндрическом канале и 200 мм * 50 мм в прямоугольном канале с частотой съемки 1 кГц. Таким образом, экспериментальные данные по измерению толщины пленки были представлены в виде $h(x,y,t)$, где x - продольная координата, y - поперечная координата, t - время. Обнаружено, что вблизи входа в канал формируются регулярные начальные волны высокой частоты, которые занимают весь орошаемый периметр канала. Вскоре после формирования эти двумерные волны разрушаются на хаотичные подковообразные волны малого поперечного размера. Благодаря множественным актам слияния подковообразных волн формируются крупномасштабные волны возмущения с большим поперечным размером. В результате поперечная однородность ("двумерность") поверхности пленки, достигнув минимума после разрушения начальных волн, восстанавливается вниз по потоку. Эта характеристика была измерена при помощи кросскорреляционного анализа временных записей толщины пленки, полученных в разных продольных сечениях канала. На основе этих данных было показано, что с ростом скорости газа сокращается размер области существования начальных волн, а формирование волн возмущения происходит ближе ко входу в канал. При помощи спектрального анализа были измерены значимые характеристики начальных волн, представляющие собой материал для сравнения с теоретическими моделями обдуваемых газом пленок жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (код проекта 16-19-10449).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УДАРНИКОВ ИЗ ВЫСОКОПОРИСТЫХ СПЛАВОВ ПУТЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

А. Н. Ищенко¹, А. Н. Табаченко², С. А. Афанасьева¹, Н. Н. Белов¹, В. В. Буркин¹, К. С. Рогачев¹, А. Б. Скосырский², Н. Т. Югов¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, Томск

²Сибирский физико-технический институт Томского государственного
университета, Томск

Одним из основных направлений повышения проникающей способности кинетических ударников в металлические преграды является разработка высокоскоростных средств метания тел и использование новых нетрадиционных материалов с более совершенным комплексом физико-механических свойств. Предварительные исследования показали существенный прирост глубины проникания высокопористых ударников на основе тяжелых сплавов (сталь, ВНЖ) [1]. Однако из-за низкой прочности такие ударники мало пригодны для высокоскоростного метания [2]. Одним из возможных путей повышения прочности пористых сплавов на основе вольфрама +3d - металл является их легирование высокопрочными компонентами типа карбидов, боридов, нитридов и др. С этой целью методом высокотемпературного спекания получены образцы сплавов системы ВНЖК, легированных упрочняющими наполнителями — B_4C , $TiWC$, BK_8 . Испытания разрабатываемых образцов кинетических ударников производятся на гладкоствольной баллистической установке при скорости порядка 2...3 км/с, щадящий режим нагрузок на метаемое тело достигается за счет применения технологии метания с присоединенным зарядом. Проведенное математическое моделирование в рамках механики сплошной среды позволяет описать процессы взаимодействия ударников из новых композитов со стальными преградами. Исследования показали, что при высокоскоростном ударе разработанные ударники могут превосходить массогабаритные аналоги из традиционного сплава ВНЖ по глубине проникания в стальную преграду более чем на 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева С. А., Белов Н. Н., Кокорезов К. И., Табаченко А. Н., Хабибуллин М. В., Югов Н. Т. *Особенности высокоскоростного проникания сильно пористого ударника в мишень конечной толщины*. ДАН. 1997. Т. 355. № 2. С. 192–195.
2. Афанасьева С. А., Белов Н. Н., Бирюков Ю. А., Буркин В. В., Ищенко А. Н., Марцунова Л. С., Табаченко А. Н., Хабибуллин М. В., Югов Н. Т. *Ударные свойства сплавов на основе вольфрама в условиях высокоскоростного взаимодействия*. Изв. Вузов. Физика. 2012. Т 55. № 11. С. 487–490.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ 09Г2С В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

С. В. Иявойнен¹, И. А. Банщикова¹, И. В. Любашевская^{1,2}, М. А. Леган^{1,3}

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

²Новосибирский государственный университет

³Новосибирский государственный технический университет

С целью определения рациональных режимов высокотемпературного формообразования стальных оболочек проведен анализ экспериментальных данных по деформированию стали 09Г2С-12 в режиме ползучести. Для получения диаграмм упругопластического деформирования и кривых ползучести использовались цилиндрические образцы стандартных размеров. Образцы и заготовки для образцов термообработке не подвергались. Эксперименты на ползучесть проводились на установке рычажного типа, обеспечивающей задание и регистрацию нагрузки в пределах $\pm 1\%$. Образец находился в термокамере и нагревался галогенными лампами до заданной температуры в течение 40 минут, температура в процессе экспериментов поддерживалась терморегулятором с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Деформация образца определялась по зависимости $\varepsilon = \ln(L/L_0)$, где L - текущая расчетная длина образца, L_0 - начальная длина. Было проведено по 3-4 эксперимента для каждого фиксированного уровня температур: 700, 730, 750, 770 и 800°C . Эксперименты были проведены как при постоянном напряжении, так и с перегрузкой на другие уровни напряжений при фиксированных температурах. Через каждые $\Delta\varepsilon = 0,5\%$ площадь сечения образца пересчитывалась и внешняя нагрузка P осевого растяжения корректировалась так, чтобы напряжение $\sigma = P_0/S_0 = P/S$ оставалось постоянным, исходя из предположения, что материал несжимаем при ползучести. S, S_0 - текущая и начальная площади поперечного сечения рабочей части образца. Все эксперименты доводились до разрушения образцов с целью определения величин деформации ε^* к моменту разрыва образца.

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что до величин деформации порядка 10% скорость деформирования есть функция только от напряжения и температуры. При величине деформации более 10% наблюдается разупрочнение материала. Определены константы для описания нестационарных процессов деформирования с использованием уравнений ползучести и повреждаемости кинетической теории Ю.Н. Работного. Получена зависимость предельной деформации при разрушении от температуры. Найден диапазон температур $730 \div 750^\circ\text{C}$, наиболее рациональный с точки зрения величины “ресурса пластичности”, т.е. достижения максимальной предельной деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-07631-а, 16-08-00713-а).

ОБ ОДНОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ

А. Л. Казаков¹, П. А. Кузнецов², А. А. Лемперт¹

¹Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

²Институт математики, экономики и информатики ИГУ, Иркутск

Рассматривается нелинейное уравнение нестационарной фильтрации

$$u_t = u\Delta u + \frac{1}{\sigma}(\nabla u)^2, \quad (1)$$

в котором $u = u(t, x, y)$, σ — положительная константа. Данное уравнение описывает неустановившееся течение политропного газа в плоском слое пористого грунта [1], при этом u — давление газа в пласте, σ — показатель политропы. Помимо этого, уравнение (1) используется [2] при описании процессов движения грунтовых вод, лучистой теплопроводности и т. д.

Для уравнения (1) рассматривается задача с вырождением [3], предполагающая распространение возмущений по нулевому фону (задача о тепловой волне [4]). Граничный режим задается на замкнутой достаточно гладкой кривой, в силу чего удобно перейти в полярную систему координат. Уравнение (1) запишется в виде

$$u_t = u \left(\frac{1}{\rho} u_\rho + u_{\rho\rho} + \frac{1}{\rho^2} u_{\varphi\varphi} \right) + \frac{1}{\sigma} \left(u_\rho^2 + \frac{1}{\rho^2} u_\varphi^2 \right). \quad (2)$$

Для уравнения (2) рассматривается краевое условие

$$u(t, \rho, \varphi)|_{\rho=R(t, \varphi)} = f(t, \varphi). \quad (3)$$

Функции $R(t, \varphi) > 0$ и $f(t, \varphi)$ определены и аналитичны в некоторой окрестности $t = 0$ и при всех $\varphi \in [-\pi; \pi]$, причем $f(0, \varphi) = 0$, $f_t(0, \varphi) > 0$.

Для задачи (2), (3) построено решение в виде двойного ряда Тейлора

$$u(t, \rho, \varphi) = \sum_{n,m=0}^{\infty} u_{n,m}(\varphi) \frac{t^n}{n!} \frac{(\rho - R)^m}{m!}.$$

Коэффициенты определяются из систем линейных алгебраических уравнений с трехдиагональными матрицами. Доказана локальная (по времени) сходимости ряда.

Исследование обобщает результаты авторов, ранее полученные в [4] для случая стационарного краевого режима $R(t, \varphi) \equiv R(\varphi)$. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты 16-01-00608, 16-31-00291.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров А. Ф. *Избранные труды: Математика. Механика*. М.: Физматлит, 2001.
2. Vazquez J.L. *The Porous Medium Equation: Mathematical Theory*. Oxford: Clarendon Press, 2007.
3. Казаков А. Л., Лемперт А. А. *О существовании и единственности решения краевой задачи для параболического уравнения нестационарной фильтрации*. ПМТФ. 2013. Т. 54. № 2. С. 97–105.

4. Казаков А. Л., Кузнецов П. А. *Об одной краевой задаче для нелинейного уравнения теплопроводности в случае двух пространственных переменных*. СибЖИМ. 2014. Т. 17. № 1. С. 46–54.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ (ФИЛЬТРАЦИИ)

А. Л. Казаков¹, Св. С. Орлов¹, Л. Ф. Спевак²

¹Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

²Институт машиноведения УРО РАН, Екатеринбург

Уравнения нелинейной теплопроводности (фильтрации) в случае одной пространственной координаты при степенной зависимости коэффициента теплопроводности (фильтрации) от температуры (плотности) может быть записано в виде [1]

$$u_t = uu_{\rho\rho} + \frac{u_\rho^2}{\sigma} + \frac{\nu u}{\rho} u_\rho, \quad (1)$$

Здесь t — время, ρ — пространственная координата, u — искомая функция $\sigma > 0$ и $\nu = 0, 1, 2$ — константы.

Решения типа тепловой волны [2] являют собой интересный в связи с приложениями в механике сплошных сред класс решений (1). Наглядным их представлением служит конфигурация, состоящая из двух гиперповерхностей $u = \varphi(t, \rho) \geq 0$ (возмущенное решение) и $u \equiv 0$ (нулевой фон), непрерывно состыкованных вдоль некоторой достаточно гладкой кривой $\rho = f(t)$ (фронт тепловой волны).

Настоящая работа посвящена нахождению, а также качественному и количественному исследованию точных решений уравнения (1), являющихся тепловыми волнами, построение которых приводит к задачам Коши для нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, не разрешенных относительно старшей производной.

Проведен качественный анализ, установлены глобальные свойства и поведение найденных решений. В этой части исследование продолжает ранее выполненные работы авторов [3]. Получены результаты, которые позволяют описать глобальные свойства соответствующих тепловых волн.

Разработан алгоритм численного решения на основе граничноэлементного подхода, развиваемого авторами [4]. Численный анализ позволил верифицировать и уточнить качественные оценки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-01-00608, 16-31-00291).

ЛИТЕРАТУРА

1. Vazquez J. L. *The Porous Medium Equation: Mathematical Theory*. Oxford: Clarendon Press, 2007.
2. Сидоров А. Ф. *Избранные труды: Математика. Механика*. М.: Физматлит, 2001.

3. Казаков А. Л., Орлов Св. С. *О некоторых точных решениях нелинейного уравнения теплопроводности*. Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2016. Т. 22. № 1. С. 102–113.
4. Kazakov A. L., Spevak L. F. *An analytical and numerical study of a nonlinear parabolic equation with degeneration for the cases of circular and spherical symmetry*. Applied Mathematical Modelling. 2016. V. 40. Iss. 2. Pp. 1333–1343.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ В ШАРЕ

С. Г. Казанцев

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

В настоящей работе конструируются полиномиальные векторные поля в шаре \mathbb{B}^3 , служащие ортогональными базисами для следующих пространств Соболева, связанных с операторами ротор rot и дивергенция div :

$$\mathbf{H}(\nabla*) = \{\mathbf{v} \in \mathbf{L}_2 : \nabla*\mathbf{v} \in \mathbf{L}^2\}, \quad \mathbf{H}(\nabla* = 0) = \{\mathbf{v} \in \mathbf{H}(\nabla*) : \nabla*\mathbf{v} = 0\},$$

а также для соответствующих им подпространств с однородными граничными условиями:

$$\mathbf{H}_0(\nabla*) = \{\mathbf{v} \in \mathbf{H}(\nabla*) : \mathbf{n} * \mathbf{v} = \mathbf{0} \text{ на } \mathbb{S}^2\},$$

$$\mathbf{H}_0(\nabla* = 0) = \{\mathbf{v} \in \mathbf{H}_0(\nabla*) : \nabla*\mathbf{v} = 0\}.$$

Здесь \mathbf{n} есть единичный вектор внешней нормали на сфере \mathbb{S}^2 , ∇ — оператор градиента, символ $*$ означает либо скалярное \cdot , либо векторное \times произведения. При этом, соответственно, получаются операторы дивергенции $\text{div} \equiv \nabla \cdot$ и ротора $\text{rot} \equiv \nabla \times$.

Ранее в работе [1] для пространства $\mathbf{L}_2 \equiv \mathbf{L}_2(\mathbb{B}^3)$ векторных полей в единичном шаре был построен ортогональный базис из полиномиальных вектор-функций в соответствии с разложением Гельмгольца, т.е. с разделением базиса на три части — потенциальную, гармоническую и соленоидальную. В данной работе построены базисные поля для пространства $\mathbf{H}_0^1(\mathbb{B}^3)$, осуществляющие известное ([4]) ортогональное разложение однородного пространства \mathbf{H}_0^1 . Этот базис применяется при решении краевой задачи для уравнения Стокса. Также приводятся решения краевых задач для системы $\text{rot} - \text{div}$ и формулируются условия согласованности данных в этих краевых задачах. Рассматриваются различные спектральные задачи для дифференциальных операторов в шаре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Derevtsov E. Yu., Kazantsev S. G., Schuster Th. *Polynomial bases for subspaces of vector fields in the unit ball. Method of ridge functions*. J. Inverse and Ill-Posed Problem. 2007. V. 15. № 1. Pp. 19–55.
2. Казанцев С. Г., Кардаков В. Б. *Векторные поля в шаре и разложение Гельмгольца*. XXXVI Дальневосточная Математическая Школа-Семинар имени академика Е.В. Золотова, 2012, Владивосток.
3. Алексеев Г. В. *Оптимизация в стационарных задачах тепломассопереноса и магнитной гидродинамики*. М.: Научный мир, 2010.

4. Girault V., Raviart P.-A. *Finite Element Methods for Navier-Stokes Equations. Theory and Algorithms*. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, Springer-Verlag, 1986.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

Ю. И. Капанов

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

Обсуждаются вопросы, связанные с моделированием течений несмешивающихся жидкостей в недеформируемых пористых средах. Значительное внимание уделяется проблеме интерпретации результатов экспериментов с точки зрения использования их, как средства восстановления базовых параметров модели. Однако конкретные реализации опытов включают в себя, как правило, серию специального типа технических дополнений, которые часто неизбежны, но которые способны значительно воздействовать на характерные свойства потока.

В докладе формулируется ряд новых условий, цель которых - доопределить постановки задач, существенно приблизив последние к конкретному эксперименту. Для отдельных типов течений построены решения соответствующих задач. Установлено, что без учета указанных дополнительных условий корректная интерпретация результатов эксперимента оказывается несостоятельной.

Использование полученных решений позволило оценить применимость ряда известных подходов приближенного характера к описанию исследуемого класса течений. При этом оказалось, в частности, что широко распространенная на практике схема Баклея–Леверетта в точном смысле не приводит к приближенному решению, но скорее порождает асимптотические во времени зависимости.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕУПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ

В. И. Капустин¹, К. В. Захарченко^{1,2}

¹*Новосибирский государственный технический университет*

²*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Необратимые процессы, проходящие в материале под действием внешних нагрузок, сопровождаются рассеиванием энергии, что делает возможным их обнаружение на ранних стадиях деформационными и термографическими методами [1, 2]. Способы, основанные на изучении диссипативного разогрева материала, в настоящее время активно применяются в исследованиях, связанных с изучением зарождения и развития усталостных трещин, а также для исследования закономерностей преобразования энергии при периодическом деформировании [3].

В работе представлена методика определения характеристик предельного цикла напряжений, в котором активизируются диссипативные процессы при напряжении ниже предела текучести материала. При определении напряжения активизации диссипативных процессов

измеряются и анализируются характеристики деформированного состояния образца и его термодинамическая температура.

Характеристики предельного (с точки зрения физики самопроизвольных процессов) цикла сопоставляются с предельными характеристиками материала (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести), полученными с использованием стандартных методов.

Экспериментально показывается, что максимальное напряжение предельного цикла, определяемое по данной методике, имеет закономерность диаграмм предельных напряжений усталости (диаграмм Смита) и может быть использовано в экспресс методах диагностики усталостных свойств материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-08-00483, 16-31-00460).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишакин В. В., Ключников В. А., Гончар А. В. *Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали*. Журнал технической физики. 2015. Т. 85. В. 5. С. 32–36.
2. Капустин В. И., Гилета В. П., Терешин Е. А. *Об определении пределов упругости по диссипативному разогреву материалов*. ПМТФ. 2010. Т. 51. № 3. С. 112–117.
3. Diaz F. A., Patterson E. A., Tomlinson R. A., Yates J. R. *Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity*. Fatigue and fracture of engineering materials and structures. 2004. № 27. Pp. 571–583.

ОСОБЫЕ ТОЧКИ В ЗАДАЧЕ ВОИНОВЫХ

Е. А. Карабут, Е. Н. Журавлева

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

Рассматривается плоское нестационарное течение жидкости, ограниченной свободной поверхностью с кумулятивной струей. Впервые такая задача исследовалась в работе [1].

Решение задается голоморфными в области течения функциями, поэтому все сингулярности должны находиться вне жидкости. Когда одна из особых точек приближается к свободной поверхности, то это вызывает ее значительную деформацию, приводящую к формированию кумулятивной струи. Кривизна свободной границы управляется эффектом ближайшей сингулярности. Соответствующий асимптотический анализ для исследования явления требует дополнительной информации о местоположении и характере сингулярностей. В докладе будут представлены результаты исследования характера этих сингулярностей и динамики их движения.

Изучение поведения особенностей связано с гипотезой об интегрируемости уравнений движения для течений со свободной границей, впервые выдвинутой в [2]. Последняя публикация на эту тему — работа [3]. Эта гипотеза существенно основана на некоторых предположении о характере движения особых точек и определенном их типе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента по государственной поддержке ведущих научных школ (код проекта НШ-8146.2016.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воинов О. В., Воинов В. В. *Численный метод расчета нестационарных движений идеальной несжимаемой жидкости со свободными поверхностями*. ДАН. 1975. Т. 221. № 3. С. 559–562.
2. Dyachenko A. I., Zakharov V. E. *Is free-surface hydrodynamics an integrable system?* Phys. Lett. A. 1994. V. 190. № 2. Pp. 144–148.
3. Zakharov V. E. *Free-surface hydrodynamics in conformal variables: are equations of free-surface hydrodynamics on deep water integrable?* arXiv:1604.04778v1[math-ph]. 2016.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ГИБРИДНОГО КОМПОЗИТА СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ-АЛЮМИНИЙ

Е. В. Карпов, А. Г. Демешкин

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

Стеклопластики, благодаря высокой статической удельной прочности, трещиностойкости и ряду других качеств, находят все более широкое применение в качестве конструкционных материалов. Сочетание тонких слоев алюминия и стеклопластика позволяет получать гибридные композиты с высокими конструкционными и функциональными характеристиками. Сотрудниками ВИАМ разрабатываются многослойные гибридные композиты класса СИАЛ (зарубежный аналог GLARE), состоящие из слоев алюминия толщиной 0,3-0,4 мм и тонких прослоек стеклопластика, составляющих 30-40 % объема композита [1–3].

Гибридный композит также может быть образован при добавлении к многослойным плитам или оболочкам из стеклопластика дополнительных алюминиевых слоев для защиты поверхности или увеличения прочности в целом.

Целью данной работы было экспериментальное исследование деформирования и разрушения плоских образцов из гибридных композитов, составленных из многослойного стеклотекстолита и дополнительных поверхностных и внутренних алюминиевых слоев. Обнаружено, что совместное деформирование алюминиевых и стеклотекстолитовых слоев отрицательно влияет на прочность гибридного композита при статическом и малоцикловом нагружении. Отчасти это влияние обусловлено тем, что при растяжении вдоль слоев гибридного композита образуются локализованные области растяжения стеклотекстолита поперек слоев. При малоцикловом нагружении важным фактором деградации гибридного композита является накопление остаточных пластических деформаций в алюминиевых слоях при упругом деформировании стеклопластика, что приводит к разрушению композита в результате его разгрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00679).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И. Н., Аниховская Л. И., Сенаторова О. Г., Сидельников В. В., Дементьева Л. И., Каримова С. А., Лямин А. Б. *Трещиностойкие высокопрочные легкие слоистые композиты класса СИАЛ для ремонта обшивок планера самолета*. Авиационные материалы и технологии. 2002. № 1. С. 35–41.

2. Сенаторова О. Г., Антипов В. В., Лукина Н. Ф., Сидельников В. В., Шестов В. В., Митраков О. В., Попов В. И., Ершов А. С. *Высокопрочные трещиностойкие легкие слоистые алюмопластики класса СИАЛ – перспективный материал для авиационных конструкций*. Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 28–31.
3. Шестов В. В., Антипов В. В., Серебренникова Н. Ю., Нефедова Ю. Н. *Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминиево-литиевого сплава*. Технология легких сплавов. 2016. № 1. С. 119–123.

ДИНАМИКА КАПЛИ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

М. А. Кашина¹, А. А. Алабужев^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь

Исследуются вынужденные колебания капли несжимаемой жидкости под действием неоднородного переменного электрического поля. В равновесном состоянии капля имеет форму цилиндра, ограниченного в осевом направлении параллельными твердыми плоскостями. Равновесный краевой угол – прямой. Капля окружена несжимаемой жидкостью другой плотности. Внешнее электрическое поле играет роль внешней силы, которая заставляет двигаться контактную линию. Электрическое поле периодически по времени с некоторой частотой ω . Для описания движения контактной линии используется модифицированное условие Хокинга [1]: скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональны удвоенной частоте электрического поля ω [2]:

$$\zeta_t = \pm \lambda (\zeta_z + Af(\alpha) \cos(2\omega t)),$$

где ζ – функция отклонения поверхности, λ – параметр Хокинга, характеризующий взаимодействие линии контакта с подложкой, $f(\alpha)$ – функция, описывающая пространственную неоднородность электрического поля.

Исследован случай неоднородных пластин, т.е. параметр Хокинга зависит от полярного угла. Функция, описывающая изменение коэффициента взаимодействия поверхности и жидкости (линии контакта), раскладывалась в ряд по собственным функциям оператора Лапласа. При рассмотрении неоднородности, периодической вдоль поверхности, возбуждается весь спектр четных мод по азимутальному углу. Следовательно, в отличие от неоднородного электрического поля, в данном случае не возбуждается трансляционное движение для любого волнового числа. При используемом условии Хокинга амплитуда колебаний поверхности капли растет пропорционально напряжению, максимальное отклонение краевого угла также увеличивается, что качественно согласуется с результатами экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-21-00090).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hocking L. M. *The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary*. J. Fluid Mech. 1987. V. 189. Pp. 253–266.
2. Alabuzhev A. A., Kashina M. A. *The oscillations of cylindrical drop under the influence of a nonuniform alternating electric field*. J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 681. 012042.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская

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

Одним из методов управления ламинарно-турбулентным переходом является локальное формирование поверхности тела, например, с помощью неглубокой, рифленой, волнистой поверхности, которая создает относительно устойчивый свободный сдвиговый слой [1]. Данный метод является новым, и интегральный эффект от волнистой поверхности остается не исследованным. Главная цель этой работы - проверить концепцию стабилизации пограничного слоя с помощью волнистых поверхностей разного типа.

Численное моделирование гиперзвукового ($M_\infty=6$) обтекания сплошной пластины и пластины с волнистостью проведено на базе решения двумерных уравнений Навье – Стокса с помощью пакета ANSYS Fluent, созданы встраиваемые в пакет модули для введения в пограничный слой возмущений типа вдув-отсос. Выполнена верификация программы расчета сравнением с имеющимися в литературе данными по пульсациям давления на поверхностях моделей. Показано, что волнистость поверхности существенно снижает пульсации давления на поверхности пластины и не увеличивает значения средних тепловых потоков. Снижение уровня пульсаций на волнистой поверхности не мгновенно, поскольку сохраняется со временем. Получены данные по эффективности воздействия волнистых поверхностей разного вида на интенсивность возмущений в гиперзвуковом пограничном слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00782).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bountin D., Chimitov T., Maslov A., Novikov A., Egorov I., Fedorov A., Utyuzhnikov S. *Stabilization of a Hypersonic Boundary Layer Using a Wavy Surface*. AIAA J. 2013. V. 51. N. 5. Pp. 1203–1210.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ РДТТ С УЧЕТОМ ПРОГАРА ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВА

А. Е. Кирюшкин, Л. Л. Миньков

Томский государственный университет

Для численного моделирования работы РДТТ на всем участке его работы необходимо учитывать прогар топливной пашки с течением времени, что приводит к необходимости решать уравнения газовой динамики в меняющейся со временем области. Для численного решения подобного типа задач часто используются неструктурированные вычислительные

сетки, которые деформируются и затем перестраиваются заново. Однако такой подход имеет ряд минусов.

В данной работе используется алгоритм, позволяющий численно решать задачи внутренней баллистики РДТТ в осесимметричной постановке с учетом прогара топливной шашки на неподвижной декартовой вычислительной сетке. Для геометрического представления поверхности и отслеживания ее эволюции во времени используется метод уровней [1], который представляется наиболее эффективным способом для представления поверхностей на неподвижной декартовой сетке. Для учета граничных условий и определения значений параметров течения в “фиктивных” точках используется обратный метод Лакса—Вендроффа, разработанный Шу [2].

В данной работе используется схема первого порядка точности по пространству и времени для определения параметров течения и схема пятого порядка точности по пространству и третьего порядка точности по времени для определения границы области и ее эволюции во времени.

В качестве примера была решена задача внутренней баллистики РДТТ на всем участке его работы для заряда зонтичного типа. Для различных моментов времени получены форма поверхности горящей шашки, а также распределение параметров течения в камере и сопле.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №9.9625.2017/БЧ

ЛИТЕРАТУРА

1. Osher S., Fedkiw R. *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*. NY: Springer, 2003.
2. Tan S., Shu C.-W. *A high order moving boundary treatment for compressible inviscid flows*. J Comput. Phys. 2011. V. 230. № 15. Pp. 6023–6036.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТВОРЕНИЯ ТИТАНА В РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ

С. П. Киселев^{1,2}, В. П. Киселев¹

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

²Новосибирский государственный технический университет,

В [1] предложена методика синтеза интерметаллида TiAl: сначала методом холодного газодинамического напыления создается слоистый композит, состоящий из пластины титана и слоя алюминия, затем производится нагрев композита до высокой температуры, при которой происходит синтез интерметаллида. В данной работе проведено численное моделирование этого процесса на атомном и макроскопическом уровне при постоянной температуре $T = 1110$ К. На рис. а приведено распределение концентрации атомов титана $c_{Ti} = n_{Ti}/(n_{Ti} + n_{Al})$, рассчитанное методом молекулярной динамики (МД). На рис. б, приведены распределения концентрации атомов Ti в расплаве алюминия в несколько моментов времени, полученные путем численного решения уравнения диффузии атомов титана в расплаве алюминия при той же температуре. При решении уравнения диффузии использовались коэффициент диффузии, равновесная концентрация и скорости растворения титана, которые были найдены из расчета, выполненного на атомном уровне методом МД.

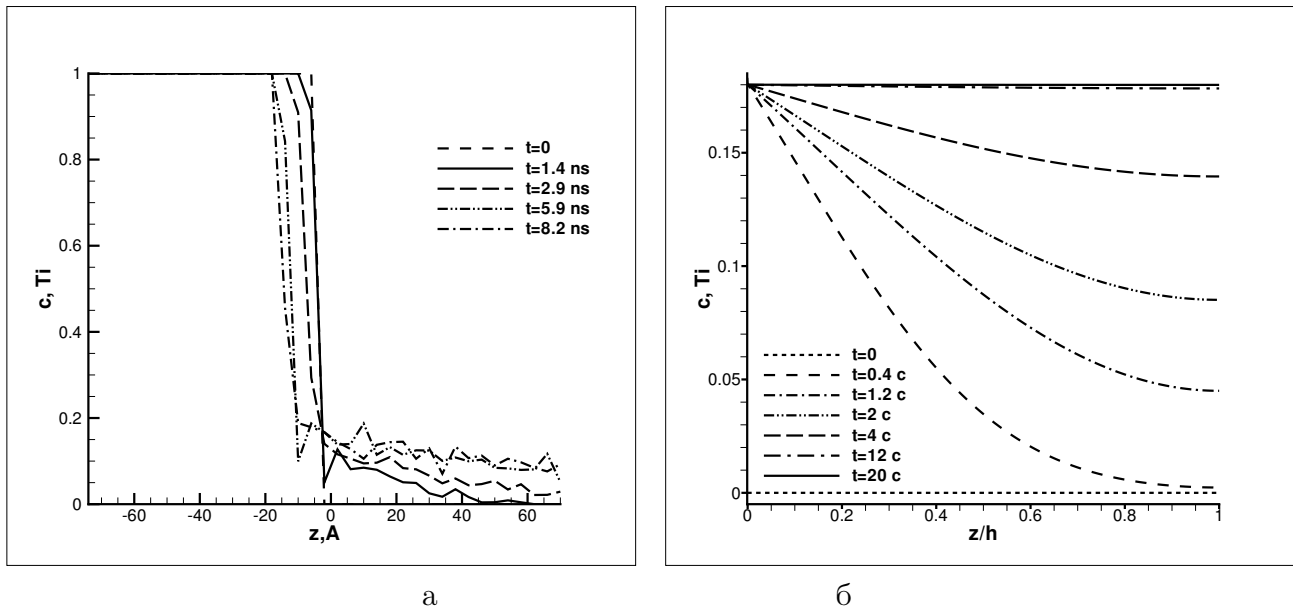


Рис. Результаты расчетов: а — распределение $c(z, t)$ атомов Ti в наночастице Ti-Al, рассчитанное методом МД; б — распределение $c(z, t)$, полученное решением уравнения диффузии атомов Ti в расплавленном слое Al толщиной $h = 150$ мкм

Из рис. б видно, что синтез интерметаллида $TiAl_3$ в данной слоистой системе при температуре $T = 1110$ К происходит за время $t_0 = 20$ с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kiselev S. P., Ryashin N. S. *Ti-Al intermetallic compounds synthesis in cold spray coatings*. Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Abstracts, Part 1. Perm, 2016. P. 118–119.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В РАДИАЛЬНЫХ СОПЛАХ

С. П. Киселев^{1,2}, В. П. Киселев¹, В. Н. Зайковский¹

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

²Новосибирский государственный технический университет

В работе исследованы сверхзвуковые нестационарные течения в радиальном сопле, которое образовано двумя соосно расположенными дисками, расстояния между дисками (ширина сопла h). Вблизи оси в сопло подается газ из камеры высокого давления p_0 . В экспериментах измерялось среднее (по времени) статическое давление на поверхности внешнего диска. Численное моделирование производилось в осесимметричном приближении в рамках SST – к – омега модели турбулентности. Подробная постановка задачи приведена в работе [1]. На рис. а приведена рассчитанная картина течения в радиальном сопле в окрестности выходного сечения. В течении газа наблюдаются автоколебания (см. рис. б), которые вызваны прониканием волн давления по пограничному слою из окружающего пространства, куда происходит истечение струи.

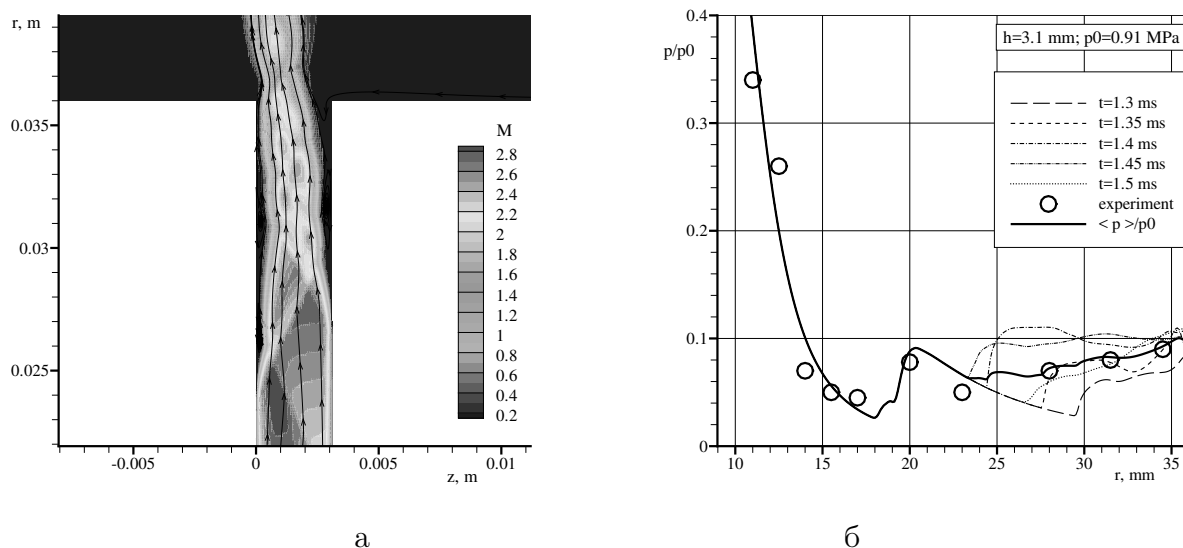


Рис. Результаты расчетов и эксперимента для радиального сопла шириной $h = 3.1$ мм, давление в форкамере $p_0 = 0,9$ МПа: а – поле числа Маха $M(r, z)$ при $t = 1,45$ ms; б – штриховыми линиями показаны рассчитанные значения давления на внешней поверхности диска в различные моменты времени $p(r, z, t)/p_0$, сплошной линией показано среднее (по времени) давление, кружками – данные эксперимента

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00156).

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н. *О механизме автоколебаний сверхзвуковой радиальной струи, истекающей в затопленное пространство*. ПМТФ. 2016. Т. 57. № 2. С. 53–63.

ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСИ В РАМКАХ ФРАКТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НА ЛИНЕЙНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ В КОНЦЕНТРАЦИОННОМ АНАЛОГЕ ЗАДАЧИ ХОРТОНА—РОДЖЕРСА—ЛЭПВУДА

Л. С. Клименко, Б. С. Марышев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Исследуется линейная задача о возникновении конвективного течения смеси в горизонтальном слое пористой среды при заданном вертикальном градиенте концентрации, в навязанном внешнем горизонтальном фильтрационном нестационарном потоке при учете осаждения частиц примеси на твердый скелет пористой среды. Подобная задача без учета осаждения примеси в отсутствие внешнего потока впервые была решена в [1]. Было показано, что

возникающий конвективный режим представляет собой набор конвективных ячеек, ширина которых равна толщине слоя. Влияние внешнего горизонтального потока (прокачки) на возникающий конвективный режим было исследовано в [2]. В настоящей работе исследуется влияние осаждения примеси на конвективные режимы в рамках фрактальной линейной модели мобильно/немобильной среды (fMIM) [3].

В случае стационарного внешнего потока получено, что учет осаждения приводит к увеличению критического значения числа Релея-Дарси с увеличением интенсивности внешнего потока. Получены уравнения, определяющие частоту нейтральных колебаний и критическое значение числа Релея-Дарси. Исследованы асимптотики больших и малых интенсивностей прокачки, показано, что при большой интенсивности влияние осаждения примеси сводится лишь к повышению устойчивости за счет исключения части примеси из потока. Исследованы зависимости критических параметров от параметров осаждения. Численно получены карты устойчивости в широком диапазоне параметров системы.

В случае пульсирующего внешнего потока получено амплитудное дифференциальное уравнение определяющее динамику системы. Аналитически исследован предел малой интенсивности внешнего потока, показано, что наличие пульсаций потока вносит дополнительный аддитивный вклад в критическое значение числа Релея-Дарси. Таким образом, введение пульсаций приводит к дополнительному повышению устойчивости. Численно исследовано параметрическое возбуждение конвекции в широком диапазоне параметров, показана возможность управления возникающими режимами конвекции с помощью частоты и интенсивности внешнего потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-21-00090).

ЛИТЕРАТУРА

1. C. W. Horton and F. T. Rogers *Convection currents in a porous medium*. J. Appl. Phys. 1993. V. 16. P. 367.
2. M. Prats *The effect of horizontal fluid flow on thermally induced convection currents in porous mediums*. J. Geophys. Res. 19663. P. 483.
3. R. Schumer, D. A. Benson, M. M. Meerschaert, B. Bauemer *Fractal mobile/immobile solute transport*. Water Resour. Res. 2003. V. 39. Pp. 1-10.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛА В ОДНОМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ ПОЛЗУЧЕСТИ

А. М. Коврижных, С. А. Коврижных

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

Предлагается сдвиговая модель накопления повреждений при деформировании материала в условиях ползучести. Считается, что необратимая деформация является результатом сдвига, происходящего в направлении действия максимального касательного напряжения [1]. Одновременно в направлении перпендикулярном к плоскости сдвига может происходить изменение нормальной деформации, дилатансия. Такой подход позволяет учитывать развитие

трещин и пор на фоне растущих деформаций ползучести без применения кинетического уравнения поврежденности материала [2, 3]. Разрушение материала начинается при достижении максимальным сдвигом предельной величины, что приводит к потере сдвиговой прочности в данной точке. Полное разрушение деформируемого тела происходит при потере сдвиговой прочности материала во всех точках тела. С применением модели, основанной на максимальном касательном напряжении и степенном законе, решены задачи о деформировании и разрушении упруго-ползучего тела в стадиях неустановившейся и установившейся ползучести.

В задаче о деформировании и разрушении цилиндрической полости под действием внутреннего давления при установившейся и неустановившейся ползучести получены новые решения для определения деформаций ползучести, положения фронта разрушения и скорости его распространения. В задаче о кручении круглого стержня определены напряжения, деформации ползучести, времена начала и полного разрушения. Для установившейся ползучести отношение времени полного разрушения к времени начала разрушения стержня при кручении совпадает с результатом, полученным в [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Коврижных А. М. *Вариант теории пластического течения, основанный на сдвиговом механизме деформирования*. ПМТФ. 1982. № 6. С. 133–138.
2. Качанов Л. М. *Теория ползучести*. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960.
3. Работнов Ю. Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966.

ВОЛНОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ПОДЪЕМЕ БРУСА ИЗ ВОДЫ

О. А. Ковыркина¹, В. В. Остапенко^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

Экспериментальное изучение подъема стеклянного круглого диска с поверхности воды, целью которого было объяснить процесс лакания кошачьими, выполнено в [1]. Для теоретического объяснения этих результатов в [2] предложена линеаризованная модель данного процесса, основанная на эвристическом предположении, что скорость движения границы области контакта жидкости пропорциональна местной скорости течения. В [3]– [5] в рамках первого приближения теории мелкой воды изучены волновые течения, возникающие при вертикальном подъеме прямоугольного бруса, частично погруженного в воду, заполняющую прямоугольный призматический канал с горизонтальным дном. На первом этапе, подробно исследованном в [3], нижняя поверхность бруса полностью находится под водой. Течение жидкости на втором этапе, когда нижняя поверхность бруса начинает выходить из воды, существенно зависит от знака функции $G = R^2 - R'$, где $R = H'/H$, $H = H(t)$ — заданный закон подъема бруса. При $G > 0$ брус препятствует свободному подъему жидкости за ним и граница смоченной части нижней поверхности бруса движется с докритической скоростью [4]. При $G = 0$ брус не влияет на течение жидкости на втором этапе и граница его смоченной части движется вдоль характеристики системы уравнений мелкой воды [5]. В этих

двух случаях отрыв жидкости от бруса происходит при глубине равной начальной глубине жидкости вне бруса. При $G < 0$ брус ускоряет подъем жидкости, примыкающей к нему на втором этапе, и граница его смоченной части движется с критической скоростью, вдоль линии, огибающей уходящие с нее характеристики [5]. В этом случае отрыв жидкости от бруса может происходить при глубине существенно превосходящей начальную глубину жидкости вне бруса. Получены явные формулы для скорости течения жидкости в области, примыкающей к брусу, а также для скорости движения границы области контакта бруса и жидкости на втором этапе. Течение жидкости в области вне бруса находилось численно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reis P. M., Jung S., Aristoff J. M., Stocker R. *How cats lap: water uptake by Felis catus*. Science. 2010. V. 330. Pp. 1231–1234.
2. Korobkin A. A. *A linearized model of water exit*. J. Fluid Mech. 2013. V. 737. Pp. 368–386.
3. Кузнецова В. В., Остапенко В. В. *Волновые течения, возникающие при вертикальном подъеме из мелкой воды прямоугольного бруса*. ПМТФ. 2015. Т. 56. № 5. С. 102–110.
4. Кузнецова В. В., Остапенко В. В. *Волновые течения, возникающие при подъеме прямоугольного бруса, частично погруженного в мелкую воду*. ДАН. 2016. Т. 467. № 2. С. 163–167.
5. Ostapenko V. V., Kovyorkina O. A. *Wave flows induced by lifting of a rectangular beam partly immersed into shallow water*. J. Fluid Mech. 2017. V. 816. Pp. 442–467.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ В СВЯЗАННОЙ И НЕСВЯЗАННОЙ ПОСТАНОВКАХ

М. Е. Кожевникова¹, Т. А. Ротанова¹, А. В. Валов²

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

²Новосибирский государственный университет

На базе метода конечных элементов проведено компьютерное моделирование плоской линейной задачи термоупругости для неоднородной среды с отверстием в связанной и несвязанной постановках. При дискретизации уравнений использовался метод конечных элементов, основанный на слабой форме уравнений термомеханики при условии квазистатического деформирования [1], [2]. Метод конечных элементов реализован в «домашнем» коде Pioneer [3]. Задача об охлаждении полого цилиндра с заданными температурами и напряжениями на внутренней и внешней поверхностях цилиндра решалась с использованием 8-узловых конечных элементов с неполной биквадратичной аппроксимацией геометрии и перемещений [1]. Численные эксперименты показали, что для данного класса задач решение уравнений термоупругости в связанной и несвязанной постановках дают близкие результаты по напряжениям, деформациям, перемещениям. Полученные результаты согласуются с утверждением о том, что при использовании теории линейной термоупругости член в уравнении баланса тепловой энергии, отвечающий за механическую мощность внутренних сил, мало влияет на полученное решение [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-01635).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bathe K. J. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, New Jersey, Upper Saddle River, 1996.
2. Polivka R. M., Wilson E. L. *Finite Element Analysis of Nonlinear Heat Transfer Problems*. University of California, Berkeley, 1976.
3. Korobeinikov S. N., Agapov V. P., Bondarenko M. I., Soldatkin A. N. *The general purpose nonlinear finite element structural analysis program PIONER*. Proc. Int. Conf. Num. Meth. Appl. Sofia: Publ. House Bulgarian Acad. Sci., 1989. Pp. 228–233.
4. Kleiber M., Kowalczyk P. *Introduction to Nonlinear Thermomechanics of Solid*. Springer, 2016.

О ВЛИЯНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДЯЩЕГО ТРУБОПРОВОДА НА КАВИТАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ

И. И. Козлов, С. А. Очеретяный, В. В. Прокофьев

Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

Рассматривается задача о возникновении кавитационных автоколебаний при течении в магистрали с двумя сопротивлениями (типа диафрагм). За первым сопротивлением образована искусственная вентилируемая каверна со средним давлением большим атмосферного, через второе сопротивление происходит истечение в атмосферу. Исследования показали, что частоты автоколебаний в основном определяются свойствами каверны. Обнаружены две стадии процесса, определяющие период колебаний - это время распространения волн жидкости вдоль границы каверны и время выбрасывания под действием повышенного давления жидкой порции в атмосферу. Оказалось, что скорость распространения волн близка к стационарной скорости на границе каверны. Поэтому с ростом поддува газа (и с увеличением давления в каверне) время первой фазы увеличивается, тогда, как время второй фазы уменьшается. Это объясняет тот факт, что для длинных каверн частота падает с ростом поддува, а для коротких, где доминирует вторая фаза, наоборот растет. Оказалось, что автоколебания при заданной геометрии течения зависят не только от локальных характеристик, таких как напор жидкости и расход поддуваемого газа, но и от характеристик подводющих магистралей и от объема каверны. При одинаковых геометрии и средних характеристиках течения, в зависимости от свойств подводящего трубопровода и объема каверны в эксперименте наблюдалось до 4-х частотных мод автоколебаний. Исследования показали, что различные моды автоколебаний отличаются различным количеством волн на границе каверны. Предполагается, что возникновение различных мод колебаний связано с взаимодействием двух колебательных систем различной природы - гидродинамической (каверна) и акустической (подводящая труба). Этим можно объяснить сильный масштабный эффект, так как гидродинамические колебания зависят от скорости течения, а акустические практически не зависят (при скоростях распространения акустических волн много больших скорости жидкости).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕКМЕНТА ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА И ПРОТЕЗА МЕЖПОЗВОНОЧНОГО ДИСКА

Т. В. Колмакова^{1,2}, Ю. А. Рикун²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

Одной из важнейших конструкций человеческого организма является позвоночник. Его строение позволяет выполнять функции опоры и движения [1].

Основной причиной появления сильных болей в спине и шее у людей среднего и пожилого возраста является дегенерация межпозвоночного диска (МПД). Радикальным методом лечения в этих случаях является замена межпозвоночного диска имплантатом. Адекватная разработка и индивидуальный подбор имплантатов играет решающую роль в лечении человека. Неправильный выбор материалов и конструкции имплантатов может привести к ухудшению состояния костной ткани и функционированию позвоночника в целом. Использование методов компьютерного моделирования позволяют более глубоко изучить закономерности функционирования человеческого организма в норме, при патологиях и способствует разработке и подбору подходящего протеза для конкретного индивидуума.

В рамках данной работы была построена модель сегмента С3-С4 шейного отдела позвоночника. Изучено напряженно-деформированное состояние сегмента в норме и при дегенеративных изменениях межпозвоночного диска [2]. Построена компьютерная модель протеза межпозвоночного диска, прототип которой разработан в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Модели строились в программном комплексе ANSYS. Алгоритм построения геометрических моделей сегмента и протеза МПД реализован на языке программирования APDL и позволяет автоматически менять форму, размер протеза и сегмента при изменении входных параметров.

В работе планируется провести компьютерные исследования механического поведения керамического протеза МПД различной модификации в шейном сегменте позвоночника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремер Ю. *Заболелания межпозвонковых дисков*. М.: МЕДпресс-информ, 2013.
2. Kolmakova T. V. *Study of the influence of degenerative intervertebral disc changes on the deformation behavior of the cervical spine segment in flexion*. AIP Conf. Proc. 2016. № 1783. P. 020095.

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА NiCr-TiC В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

И. С. Коноваленко^{1,2}, Е. В. Шилько¹, В. Е. Овчаренко¹, С. Г. Псахье¹

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

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

В настоящее время значительная часть режущих элементов металло- и деревообрабатывающего оборудования изготавливается из металлокерамических композиционных материалов. Ресурс работы таких изделий, в значительной степени определяется механическими характеристиками (прочностью, твердостью, износостойкостью) их поверхностных слоев. Одним из методов повышения этих характеристик является высокоэнергетическое импульсное электронно-пучковое облучение, приводящее к наноструктурированию поверхностных слоев изделий и формированию градиента структуры и механических свойств по глубине обрабатываемой области материала. В зависимости от используемого газа и параметров облучения в поверхностных слоях композита образуются один или два подслоя материала с иными по отношению к исходному композиту геометрическими, концентрационными и механическими параметрами компонентов. Для выяснения функциональной роли каждого из модифицированных подслоев в условиях контактного нагружения были построены многоуровневые численные модели, учитывающие особенности структуры и свойств керамической и металлической компонент в различных подслоях. В качестве метода моделирования применялся метод подвижных клеточных автоматов, являющийся представителем класса методов дискретных элементов. Результаты моделирования показали, что существенное увеличение прочностных и деформационных характеристик поверхностных слоев является следствием не только измельчения керамической компоненты и изменения геометрии керамических включений, но и формирования двухслойной структуры поверхностных слоев: верхнего тонкого и более жесткого подслоя и протяженного нижнего подслоя с жесткостью, близкой к жесткости внутренних слоев композита. Показано, что роль верхнего подслоя заключается в повышении эффективной жесткости и прочности поверхностных слоев, в то время как протяженный нижний подслой обеспечивает не только повышение прочности поверхностных слоев, но и существенное увеличение вязкости разрушения. Результаты работы могут быть полезны для разработки численных моделей деформации и разрушения гетерогенных сред, в том числе металлокерамических композитов с модифицированными поверхностными слоями.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ В ОКРЕСТНОСТИ ДВОЙНОЙ ОДНОМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ПЛАСТИН

А. П. Константинов, С. В. Сухинин

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

Исследованы особенности распространения волн вдоль двойной одномерно-периодической решетки пластин или, другими словами, изменение волноводных свойств одномерно-периодической решетки пластин [1], обусловленное размещением дополнительной решетки.

Доказано существование волн, локализованных около двойной решетки и распространяющихся вдоль направления периодичности. При помощи численно-аналитических методов описаны дисперсионные соотношения для этих волн, полосы пропускания и запираения, их зависимости от геометрических параметров области колебаний. Получены оценки для количества волноводных мод в зависимости от длины профиля решетки и расстояния между решетками. Впервые описано явление бифуркации частот по параметру расстояния между решетками. Проведены сравнения с волноводными свойствами простой ножевой решетки. Сделаны оценки параметров расщепления или слияния частот в зависимости от расстояния между элементами двойной решетки. Описана механика бегущих и стоячих волн, построен их вид.

Полученные результаты согласуются с исследованиями собственных колебаний около пластин в канале [2], которые при определенных условиях можно рассматривать как частный случай настоящей работы.

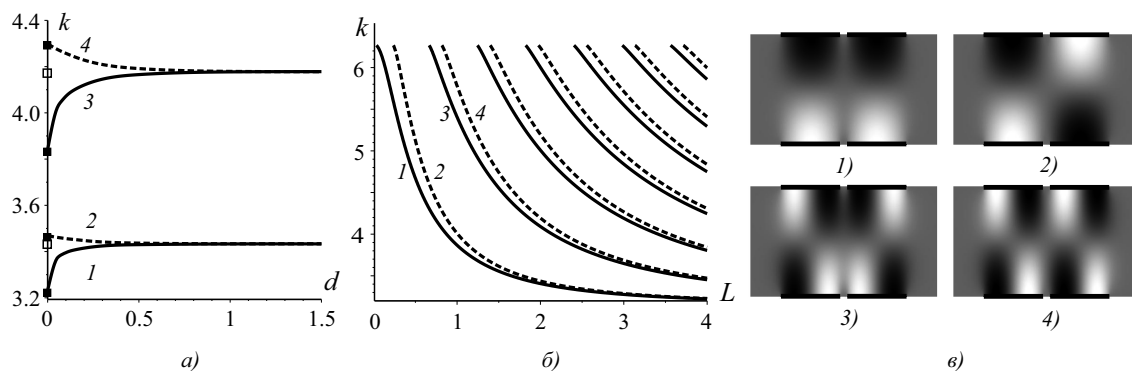


Рис. а) бифуркация частот синфазных колебаний; б) зависимость частот синфазных колебаний от длины пластин; в) вид собственных колебаний. Длина профиля решетки $L = 2$, расстояние между решетками $d = 0.25$. Цифрами отмечено соответствие мод

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухинин С. В. Волноводные и аномальные свойства периодической ножевой решетки. ПМТФ. 1998. №6. С. 46–56.
2. Константинов А. П., Сухинин С. В. Аэроакустические резонансные явления около цепочки пластин типа тандем в однородном канале. Бифуркация частот резонансных колебаний. Тез. докл. IV открытой Всерос. конф. по аэроакустике. Москва 2015, С. 83–84.

НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА И ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В. Ф. Копьев

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора
Н. Е. Жуковского, Московский комплекс, Москва
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь

В работе рассматриваются различные вопросы, связанные с неустойчивостью вихревого кольца, возникновением турбулентности вокруг вихревого ядра, излучением звука [1]. Обнаружена новая неустойчивость, которая может реализовываться как в вихревом кольце, так и в простой механической системе, состоящей из подвижного цилиндра, окруженного циркуляционным потоком, и находящегося в безграничной жидкости [2] или внутри кожуха [3]. Неустойчивость связана с раскачкой колебаний вихревого ядра (или цилиндра в механической системе, Рис. 1 (а, б)) с одновременным появлением нерегулярных мелкомасштабных возмущений (турбулизация) на периферии циркуляционного потока, Рис. 1 (б, с). Такой механизм является альтернативой известным механизмам турбулизации, связанным с дроблением вихревых структур и перезамыканием нитей или с их растяжением и интенсификацией, когда появление возмущений мелких масштабов происходит за счет 3D эволюции самого вихревого ядра.

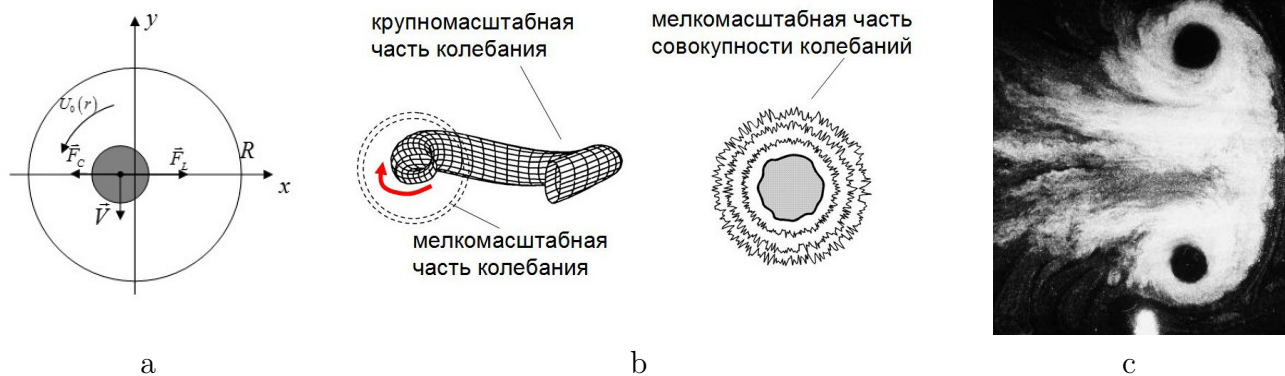


Рис. 1

Акустическое излучение вихревого кольца позволяет провалидировать в целом рассмотренный сценарий. Предсказанная в соответствии с этими представлениями картина излучения звука удовлетворительно ложится на данные эксперимента по измерению шума вихревого кольца в акустической камере [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Копьев В. Ф., Чернышев С. А. *Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука*. Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 7. С. 713–742.
2. Копьев В. Ф., Чернышев С. А. *Неустойчивость колеблющегося цилиндра в циркуляционном потоке идеальной жидкости*. МЖГ. 2000. № 6. С. 78–92.
3. Копьев В. Ф., Чернышев С. А., Юдин М. А. *Неустойчивость цилиндра при обтекании его циркуляционным потоком несжимаемой жидкости*. ПММ, 2017.

ВИХРЕВОЕ КОЛЬЦО С ИЗОХРОННЫМ ПРОФИЛЕМ ЗАВИХРЕННОСТИ

В. Ф. Копьев¹, С. А. Чернышев¹, Р. В. Акинъшин^{1,2}, М. А. Юдин^{1,2}

¹Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора
Н. Е. Жуковского, Москва

²Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный

Исследуются стационарные решения для тонкого вихревого кольца в невязкой несжимаемой жидкости в безграничном пространстве. Для построения стационарных решений рассматривается процедура Френкеля [1, 2], использующая преобразование заданного распределения завихренности в плоском течении с круговыми линиями тока к стационарному вихревому кольцу в виде разложения по параметру тонкости кольца. Так, двумерный вихрь с постоянной завихренностью преобразуется в вихревое кольцо с однородным распределением, в котором модуль завихренности пропорционален расстоянию от оси симметрии. Для этой задачи найдены следующие, не полученные ранее, члены разложения. Однако однородное распределение не является изохронным, т.е. время обращения жидких частиц по линиям тока в ядре вихря различное, несмотря на изохронность исходного двумерного течения.

Главной целью работы является построение алгоритма нахождения течения для изохронного вихревого кольца [3, 4], в котором периоды обращения одинаковы для всех жидких частиц в вихревом ядре. Поскольку двумерное распределение, переходящее в изохронное кольцо, заранее неизвестно, процедура Френкеля существенно модифицирована таким образом, что само изохронное течение определяется на каждом шаге итерационной процедуры. Для построения этого решения с произвольной точностью существенно используется полученное в работе решение для вихревого кольца с однородным распределением, к которому на каждом шагу вычисляются необходимые поправки.

Важность исследования изохронного вихревого кольца связана с тем, что все его нетривиальные колебания относятся только к дискретному спектру в то время, как кольца с другими распределениями завихренности (включая однородное [3]) обладают еще и непрерывным спектром. Это означает, что с точки зрения задачи устойчивости изохронное вихревое кольцо является простейшим 3-мерным вихревым объектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fraenkel L. E. *Examples of steady vortex rings of small cross-section in an ideal fluid*. J. Fluid Mech. 1972. V. 2. № 1. Pp. 119–135.
2. Fraenkel L. E. *On steady vortex rings of small cross-section in an ideal fluid*. Proc. Roy. Soc. Lond. A. 1970. V. 316. Pp. 29–62.
3. Копьев В. Ф., Чернышев С. А. *Vortex ring eigen-oscillations as a source of sound*. J. Fluid Mech. 1997. V. 341. Pp. 19–47.
4. Копьев В. Ф., Чернышев С. А. *Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука*. Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 7. С. 713–742.

О КАТАСТРОФИЧЕСКИХ РАЗРУШЕНИЯХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ НИЖЕ ПОРОГА ХЛАДНОЛОМКОСТИ

В. М. Корнев

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

Известны описания аварий мостов, больших резервуаров (газгольдеров и резервуаров для хранения нефти), газопроводов и судов при низких температурах [1]. Как правило, зарождение трещин (очагов разрушения) провоцируют сварные швы и участки, прилегающие к местам сварки, а также места концентрации напряжений и местные повреждения (царапины, вмятины и т.п.), появившиеся при изготовлении элементов сооружения или при недоброкачественной эксплуатации.

Рассматривается распространение трещины в элементах однородных конструкций и конструкций со сварным швом, изготовленных из квазихрупкого материала. Получены диаграммы квазихрупкого разрушения. При построении диаграмм квазихрупкого разрушения использована модель упругопластического материала, имеющего предельную деформацию. Дана сводка диаграмм квазихрупкого разрушения часто встречающихся элементов конструкций. Проведен анализ параметров, входящих в предлагаемую модель, при температурах около или ниже порога хладноломкости. Параметры модели подбираются по двум лабораторным экспериментам (критический коэффициент интенсивности напряжений и классическая диаграмма напряжения - деформация), выполненным при соответствующих температурах. Установлено, что сварные конструкции, содержащие трещины в окрестности сварного шва, обладают пониженной трещиностойкостью. Эффект долома конструкции при монотонном нагружении ярко выражен, поскольку критические нагрузки существенно уменьшаются при увеличении длины трещины. Используются диаграммы квазихрупкого разрушения при анализе катастрофических разрушений элементов стальных конструкций, работающих при температурах ниже этого порога. Обращено внимание на параметр, характеризующий пластическое деформирование материала, и исчерпание ресурса пластичности при холодной пластической деформировании материала в окрестности вершины трещины. После исчерпания ресурса пластичности температура порога хладноломкости приближается к комнатной температуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00483).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ужик Г. В. *Прочность и пластичность металлов при низких температурах*. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФЕНА СИЛОВЫМ ПОЛЕМ DREIDING

С. Н. Коробейников¹, В. В. Алехин¹, А. В. Бабичев²

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

²Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН

Метод молекулярной механики (ММ) интенсивно используется для компьютерного моделирования деформирования низкоразмерных углеродных наноструктур (однослойных графеновых листов, однослойных нанотрубок, фуллеренов и т.д.). Моделирование взаимодействий атомов углерода в этих наноструктурах в методе ММ осуществляется с использованием силовых полей. Целью настоящего исследования является подгонка значений параметров силового поля DREIDING [1] с целью наиболее близкого воспроизведения значений механических параметров графена (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, модуля изгибной жесткости и предела прочности), известных из экспериментальных данных и квантово-механических моделирований, так как стандартный набор параметров силового поля DREIDING приводит к неудовлетворительным значениям механических параметров графена. Подгонка значений этих параметров осуществляется с использованием элементарных ячеек графена с действующими на них силами, воспроизводящими однородное деформирование этого материала при его растяжении/сжатии, изгибе и разрушении (для каждого типа деформации используется свой набор элементарных ячеек с учетом анизотропных свойств графена в состояниях, близких к его разрушению).

Метод ММ реализован в конечно-элементном коде общего назначения PIONER [2]. Каждая из элементарных потенциальных энергий ковалентных взаимодействий атомов углерода наноструктур (растяжение/сжатие атомной связи, изменение угла между соседними атомными связями, кручение атомной связи, выход атома из плоскости, образуемой тремя оставшимися атомами) реализована в коде PIONER как некоторый фиктивный “конечный элемент”.

Компьютерное моделирование деформаций однослойных графеновых листов проводится с использованием кода PIONER. На базе компьютерного моделирования установлены закономерности изменения механических параметров графена, таких как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль изгибной жесткости в зависимости от масштабного фактора. Компьютерное моделирование показывает, что при достаточно больших значениях линейных размеров графеновых листов значения их механических параметров приближается к значениям механических параметров графена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-01635).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mayo S. L., Olafson B. D., Goddard III W. A. *DREIDING: A generic force field for molecular simulations*. J. Phys. Chem. 1990. V. 94. Pp. 8897–8909.
2. Korobeinikov S. N., Agapov V. P., Bondarenko M. I., Soldatkin A. N. *The general purpose nonlinear finite element structural analysis program PIONER*. Proc. Int. Conf. Num. Meth. Appl. Sofia: Publ. House Bulgarian Acad. Sci., 1989. Pp. 228–233.

МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА КОМПОЗИТА Ti-TiC

Е. Н. Коростелева¹, А. Г. Князева^{1,2}

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

² *Томский политехнический университет*

В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования процесса получения композита спеканием в твердой фазе из композитных порошков состава $Ti - Ti_xC$, изготовленных в режиме СВС с последующим измельчением. Режим спекания регулируется скоростью нагрева и временем выдержки при заданной температуре. Экспериментально обнаружено значительное изменение объема прессовки в процессе спекания (30-40% при разных температурах), связанное предположительно с изменением объема в ходе превращения фазы Ti_2C (присутствующей в продуктах СВ-синтеза) в конечный продукт, а также с удалением остаточных газообразных примесей.

Для проверки высказанной гипотезы была предложена математическая модель процесса спекания, учитывающая внешний нагрев, эндо- и экзоэффекты, связанные с удалением пластификатора и химической реакцией. Изменение объема явно связывается с явлением теплового расширения и происходящими физико-химическими изменениями. Учитывается эволюция пористости в процессе спекания и изменение свойств с температурой и пористостью. Модель реализована численно. В нульмерном приближении модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. При явном учете распределения температуры в прессовке задача теплопроводности может быть как одномерной (при условии однородного нагрева и условиях адиабатичности на торцах цилиндрической прессовки), так и двумерной — при учете потерь тепла излучением. Напряжения и деформации в прессовке, а также возможное изменение объема, рассчитываются в “псевдоупругом” приближении.

ЗАДАЧА О ВОЗНИКНОВЕНИИ ДОННЫХ ВОЛН В НАПОРНОМ КАНАЛЕ В ДВУМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Ю. Г. Крат, И. И. Потапов

Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск

В работе предложена оригинальная двумерная математическая модель, описывающая развитие донных волн под воздействием потока. Все используемые в модели феноменологические параметры относятся к гидродинамической части математической модели. Для описания движения гидродинамического потока используются уравнения Рейнольдса, которые решаются методом контрольных объемов [1]. В качестве уравнения движения влекомых наносов используется формула, предложенная в работе [2], учитывающая влияние уклонов поверхности дна, придонных нормальных и касательных напряжений на движение наносов. Решена задача о развитии дна канала под действием протекающего над ним напорного гидродинамического потока. Результаты расчетов сравнивались с решениями других авторов [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. В. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости* // Перевод с английского под редакцией В. Д. Виоленского (S. Patankar "Numerical heat transfer and fluid flow" Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980). М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Петров А. Г., Потапов И. И. *Перенос наносов под действием нормальных и касательных придонных напряжений с учетом уклона дна*. ПМТФ. 2014. Т. 55. № 5. С. 100–105.
3. Richards K. J., Taylor P. A. *A numerical model of flow over sand waves in water of finite depth*. Geophys. J.R. astr. 1981. Soc. 65. Pp. 103–128.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПРИДОННЫХ ЧАСТЯХ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

И. Ю. Крутова, А. О. Казачинский, О. В. Опрышко

*Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Снежинск*

Математически моделируются трехмерные нестационарные течения идеального политропного газа в условиях действия сил тяжести и Кориолиса. Для системы уравнений газовой динамики поставлена начально-краевая задача, решение которой описывает течение, возникающее при плавном стоке газа через поверхность вертикального цилиндра заданного ненулевого радиуса в окрестности непроницаемой плоскости $z=0$. Доказано, что данная задача также является характеристической задачей Коши стандартного вида и поэтому при условии аналитичности входных данных у нее существует единственное аналитическое решение. Анализ первых коэффициентов ряда по степеням z показал, что при начале радиального стока внутрь цилиндра сразу возникает окружное движение газа, закрученное в Северном полушарии в положительном направлении и в отрицательном направлении для случая Южного полушария. Установленные факты являются математическим обоснованием результатов соответствующих экспериментов в части возникновения закрутки и направления этой закрутки. Для моделирования трехмерного нестационарного придонного течения таких природных вихрей как торнадо и тропические циклоны используется начальный отрезок ряда, задающий это аналитическое решение. Коэффициенты начальных отрезков рядов численно строятся при решении соответствующих систем гиперболического типа. Приведены результаты расчетов газодинамических параметров и их сравнения с данными натурных наблюдений за торнадо различных классов и среднего по своим характеристикам тропического циклона. Были проведены расчеты значений величины кинетической энергии торнадо, которая состоит из двух основных составляющих: радиальной и окружной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баутин С. П. *Торнадо и сила Кориолиса*. Новосибирск: Наука, 2008.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. *Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей*. Новосибирск: Наука, 2012.

3. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. *Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты*. Новосибирск.: Наука, 2013.
4. Баутин С. П., Дерябин С. Л., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. *Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси*. Екатеринбург.: УрГУПС, 2017.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ TiNi+Si И TiNi+Ta В НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ

О. Н. Крюкова¹, А. Г. Князева^{1,2}, А. Л. Маслов¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

²Томский политехнический университет

Широкое медицинское практическое применение получил никелид титана и сплавы на его основе. Этот материал в чистом виде имеет ограниченное использование из-за токсичности никеля. Однако возможно добиться успеха, создав барьерный слой или покрытие на поверхности никелида титана, которое будет минимизировать или предотвращать высвобождение токсичного для организма никеля. Для решения данных задач может быть использован комплексный подход, который состоит из нанесения покрытия ионно-плазменным методом с последующей его обработкой низкоэнергетическим высокопоточным электронным пучком.

Эволюцию фазового состава поверхностных слоев материала невозможно наблюдать непосредственно в процессе обработки. Поэтому значительный интерес представляет моделирование неравновесных условий обработки. Результатом численного исследования является фазовый состав поверхностных слоев, что в дальнейшем можно использовать для оценки физико-механических свойств получаемых материалов. Разработка моделей, позволяющих осуществлять вычислительный эксперимент в широкой области изменения параметров, соответствующих технологическим условиям, является актуальной задачей.

В настоящей работе сформулирована модель эволюции фазового состава поверхностных слоев для систем TiNi+Si и TiNi+Ta в неравновесных условиях воздействия низкоэнергетических потоков частиц (ионов и электронов).

Математическая модель реализована численно.

Обнаружено, что вследствие особенностей диффузии новые фазы формируются преимущественно со стороны тантала в отличие от системы с покрытием из кремния, где новые фазы формируются преимущественно со стороны никелида титана. Изучена динамика фазообразования в системах и размеры областей, приходящихся на различные фазы в зависимости от параметров облучения.

Эта же модель реализована с выделением отдельной границы зерен, где диффузия и режимы химических реакций имеют особенности по сравнению с процессами в объеме. В результате получаем неоднородный фазовый состав.

Во всех вариантах исследуется влияние параметров моделей на распределение концентраций и динамику фазообразования.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований РАН на 2017-2020 гг. Проект: III.23.2.1.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А. Н. Кудрявцев, Д. В. Хотяновский

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

Начальные стадии ламинарно-турбулентного перехода в высокоскоростных пограничных слоях определяются пространственным ростом неустойчивых возмущений малой амплитуды. В соответствии с линейной теорией устойчивости и имеющимися экспериментальными данными, при больших числах Маха в пограничном слое доминирует неустойчивость второй моды, т.е. моды Маха [1]. Наклонные волны возмущений первой моды также неустойчивы, но имеют значительно меньшие инкременты нарастания. Линейная и нелинейная динамика возмущенного пограничного слоя включает, таким образом, сложное взаимодействие целого спектра волн неустойчивости, конкуренцию мод, и может приводить к совершенно различным сценариям перехода в зависимости от условий выше по потоку.

В настоящей работе выполнено прямое численное моделирование развития возмущений и перехода к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине. Расчеты проведены при числах Маха набегающего потока $M = 2$ и 6 . Используемый при проведении расчетов код основан на применении схем сквозного счета высокого порядка точности. Стационарное основное течение возбуждалось путем введения на входной границе возмущения, имеющего вид суперпозиции собственных функций линейной задачи устойчивости. При числе Маха $M = 2$ моделировался сценарий перехода, связанный с ростом и нелинейным взаимодействием двух наклонных волн Толлмина–Шлихтинга. При числе Маха $M = 6$ рассматривалось развитие суперпозиции двумерных возмущений второй моды и трехмерных возмущений первой моды. В обоих случаях рост трехмерных возмущений приводил к появлению мелкомасштабных пульсаций, стохастизации течения и переходу к турбулентности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-11-00490). Расчеты проводились на вычислительных кластерах Новосибирского государственного университета и Межведомственного суперкомпьютерного центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mack L.M. Boundary layer stability theory. Document 900-277, Rev. A. Pasadena, California, JPL, 1969, 388 p.

КВАЗИ-РЕШЕНИЯ ИСТИННО-НЕЛИНЕЙНЫХ p -УЛЬТРА-ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С ПЕРЕМЕННЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ПАРАБОЛИЧНОСТИ

И. В. Кузнецов, С. А. Саженов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Рассматривается краевая задача для неклассического уравнения в частных производных

$$\partial_t a(u) + \partial_s b(u) + \operatorname{div}_x \varphi(u) = \operatorname{div}_x (|\nabla_x u|^{p-2} \nabla_x u), \quad (\mathbf{x}, t, s) \in G_{T,S}, \quad (1)$$

$$u_\varepsilon|_{\Gamma_0} = u_0^\Gamma, \quad u_\varepsilon|_{\Gamma_T} = u_T^\Gamma, \quad u_\varepsilon|_{\Xi_0} = u_0^\Xi, \quad u_\varepsilon|_{\Xi_S} = u_S^\Xi, \quad u_\varepsilon|_\Gamma = 0, \quad (2)$$

где область пространственных переменных $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ является ограниченной и имеет гладкую границу $\partial\Omega$, независимые переменные t и s по аналогии с рядом других задач математической физики можно назвать переменными "времени". Они меняются в пределах $(0, T)$ и $(0, S)$, соответственно. Еще вводим обозначения $G_{T,S} = \Omega \times (0, T) \times (0, S)$, $\Gamma_0 = \bar{\Omega} \times \{t = 0\} \times [0, S]$, $\Gamma_T = \bar{\Omega} \times \{t = T\} \times [0, S]$, $\Xi_0 = \bar{\Omega} \times [0, T] \times \{s = 0\}$, $\Xi_S = \bar{\Omega} \times [0, T] \times \{s = S\}$, $\Gamma = \partial G_{T,S} \setminus (\Gamma_0 \cup \Gamma_T \cup \Xi_0 \cup \Xi_S)$.

В задаче (1)–(2) u является искомой скалярной функцией, a и b — заданными и, вообще говоря, нелинейными функциями; φ — заданная гладкая вектор-функция. Показатель p в нелинейном слагаемом в правой части уравнения (1) является заданной величиной. Считается, что $p > 1$. Граничные данные u_0^Γ , u_T^Γ , u_0^Ξ и u_S^Ξ заданы.

Относительно функций a и b не предполагается условий монотонности. Поэтому, в уравнении (1) допускается свойство переменной параболичности. Соответственно, краевые условия (2) в рамках общепринятой теории классических и обобщенных решений поставлены некорректно и требуют уточнения. Это уточнение достигается путем введения понятий граничных энтропийных пар [1].

Накладывается дополнительное условие

$$\operatorname{meas} \left\{ \lambda \in \mathbb{R}, \sum_{j=1}^d \varphi'_j(\lambda) \xi_j + a'(\lambda) \theta + b'(\lambda) \vartheta = 0 \right\} = 0, \quad (3)$$

для любых $(\xi_1, \dots, \xi_d, \theta, \vartheta) \in \mathbb{S}^d$, где \mathbb{S}^d — это единичная сфера в \mathbb{R}^{d+1} с центром в нуле. Первое условие такого рода было предложено П.Д. Лаксом в 1957 [2]. Оно называется условием истинной нелинейности (англ. *genuine nonlinearity*). В дальнейшем, после работы П.Д. Лакса, условие истинной нелинейности многократно обобщалось. Мы предлагаем обобщение для уравнений с переменным направлением параболичности вида (1)–(2).

Основными результатами работы являются построение кинетической формулировки задачи (1)–(2) и доказательство существования квази-решений этой задачи.

Главными инструментами доказательств являются метод кинетического уравнения [3] и теория H -мер Тартара [4].

Задачи вида (1)–(2) относятся к неклассическим задачам математической гидродинамики. Они систематически рассматривались, например, в работах С.А. Терсенова [5], [6] и В.Н. Монахова [7].

Квази-решение задачи (1)–(2) конструируется как предел (при стремлении малого положительного параметра ε к нулю) решений задачи Дирихле для нелинейного эллиптического уравнения:

$$\partial_t a(u_\varepsilon) + \partial_s b(u_\varepsilon) + \operatorname{div}_x \varphi(u_\varepsilon) = \operatorname{div}_x (|\nabla_x u_\varepsilon|^{p-2} \nabla_x u_\varepsilon) + \varepsilon \partial_t^2 u_\varepsilon + \varepsilon \partial_s^2 u_\varepsilon, \quad (\mathbf{x}, t, s) \in G_{T,S}, \quad (4)$$

$$u_\varepsilon|_{\Gamma_0} = u_0^\Gamma, \quad u_\varepsilon|_{\Gamma_T} = u_T^\Gamma, \quad u_\varepsilon|_{\Xi_0} = u_0^\Xi, \quad u_\varepsilon|_{\Xi_S} = u_S^\Xi, \quad u_\varepsilon|_\Gamma = 0. \quad (5)$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-11-20019) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-08275).

ЛИТЕРАТУРА

1. Otto F. *Initial-boundary value problem for a scalar conservation law*. C. R. Acad. Sci. Paris Ser. I. Math. 1996. V. 322. Pp. 729–734.
2. Lax P. D. *Hyperbolic systems of conservation laws II*. Comm. Pure Appl. Math. 1957. V. 10. Pp. 537–566.
3. Perthame B. *Kinetic Formulation of Conservation Laws*. Oxford Univ. Press. 2002.
4. Tartar L. *The General Theory of Homogenization. A Personalized Introduction*. Springer-Verlag. 2009.
5. Терсенов С. А. *Об основных краевых задачах для одного ультрапараболического уравнения*. СМЖ. 2001. Т. 42, № 6. С. 1413–1430.
6. Терсенов С. А. *О некоторых задачах для прямо и обратно параболических уравнений*. СМЖ. 2010. Т. 51. № 2. С. 420–427.
7. Монахов В. Н. *Возвратные течения в пограничном слое*. ДСС. 1998. В. 113. С. 107–113.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Н. Дородников

Волгоградский государственный технический университет

По результатам проведенных ранее исследований впервые был обнаружен эффект изменения структуры и свойств сварных соединений однородных металлов в условиях сварки взрывом с одновременным воздействием ультразвука, проявляющийся в увеличении прочности соединения, микротвердости и существенном уменьшении параметров волн и количества оплавленного металла в околосшовной зоне по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука [1]. В связи с вышеизложенным, целью данной работы являлось исследование влияния ультразвуковых колебаний в условиях сварки взрывом на структуру и свойства получаемых соединений разнородных металлов. Установлено, что при сварке взрывом меди с алюминием под воздействием ультразвука наблюдается существенное уменьшение количества оплавленного металла во всем диапазоне свариваемости, принципиально меняется и форма участков оплавленного металла, граница соединения имеет более прямолинейный профиль, в сравнении с образцами, полученными сваркой взрывом без воздействия ультразвука

[2]. Показано, что одновременное воздействие ультразвука при сварке взрывом позволяет повысить качество получаемых медно-алюминиевых соединений, заключающееся в повышении прочности околошовной зоны такого композита, расширить область свариваемости металлов, а, следовательно, более обосновано подойти к оптимизации режимов взрывного нагружения, обеспечивающих получение высокопрочных соединений с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-09438а), а также при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках “Совета по грантам Президента РФ” (СП-1940.2016.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Кузьмин Е. В., Дородников А. Н. *Формирование структуры и свойств свариваемых взрывом соединений под действием ультразвука*. Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 8. С. 861–866.
2. Кузьмин Е. В., Лысак В. И., Кузьмин С. В., Пеев А. П. *Особенности получения композиционных материалов сваркой взрывом с воздействием ультразвука*. Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2016. № 1. С. 51–55.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД ТЕЧЕНИЙ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ХИМОКИНЕТИКИ ВОДОРОДА

И. М. Куликов¹, И. Г. Черных^{1,2}, В. А. Протасов³

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Новосибирский государственный технический университет

В настоящей работе представлена новая численная схема с малой диссипацией решения уравнений магнитной газовой динамики с учетом химических процессов и ее программная реализация. Численный метод базируется на разработанном ранее гибридном методе, в основе которого лежит комбинация метода разделения операторов и метода Годунова [1, 2]. Для обеспечения малой диссипации решения используется кусочно-параболический метод на локальном шаблоне на каждом этапе исходной схемы. Специальный алгоритм построения локальной параболы позволил полностью отказаться от TVD реконструкций численного решения в области разрывных решений. Описаны детали численного метода, приведены основные тесты и схема параллельной реализации. Смоделирована химодинамика водорода в процессе турбулентного образования молекулярных облаков. При этом мы ограничимся рассмотрением только МГД течений и модельные задачи будем рассматривать именно в МГД приближении.

В основе параллельной реализации – геометрическая декомпозиция расчетной области с одним слоем перекрытия подобластей средствами MPI. Было проведено исследование масштабируемости программного кода на кластере NKS-30T ССКЦ, где была достигнута 93% эффективность при использовании 768 вычислительных ядер процессора Intel Xeon X5670.

Для верификации численного метода и программной реализации были исследованы в трехмерной МГД постановке три задачи: задача столкновения двух галактических кластеров с разной массой, задача взаимодействия молекулярного облака с межзвездной средой и задача развития МГД турбулентности межзвездной среды с учетом химических реакций. Первые две задачи мы рассматриваем как некоторые тестовые постановки и надеемся на использование настоящего кода для аналогичных, но более сложных постановок задач. Третья задача была решена в полной многофазной МГД постановке с учетом химокинетики водорода.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 15-01-00508 и 16-07-00434, грантом Президента РФ МК – 1445.2017.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kulikov I. Chernykh I. Protasov V. *Mathematical modeling of formation, evolution and interaction of galaxies on cosmological context*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 722
2. Protasov V. Serenko A. Nenashev V. Kulikov I. Chernykh I. *High-Performance Computing in Astrophysical Simulations*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 681. Pp. 1–6.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОЦЕССОМ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

А. Г. Куликовский¹, Е. И. Свешникова²

¹Математический институт им. В. А. Стеклова РАН, Москва

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Рассматривается автомодельная задача о набегании потока невзаимодействующих частиц на плоскую неподвижную стенку с образованием упругой среды в результате уплотнения и соединения частиц между собой. Считается, что образующаяся среда несжимаемая, нелинейная, анизотропная и присоединяется к стенке без проскальзывания. Набегающий поток считается однородным, все частицы в котором движутся с одной и той же скоростью, имеющей нормальную к стенке и касательные компоненты. Возникающее в образовавшейся упругой среде движение одномерно, все величины зависят от x/t , где x — расстояние от стенки. Впереди движется фронт затвердевания, в котором образуется упругая среда из потока частиц и могут возникать упругие напряжения (и деформации). Если скорость фронта достаточно велика, то следом за ним по упругой среде могут распространяться нелинейные упругие волны (ударные или волны Римана).

Ранее авторами при определенных предположениях были исследованы элементы, из которых строится решение задачи: волны Римана и ударные волны в упругой среде [1], а также изменение величин во фронтах затвердевания [2]. В данной работе проведено построение решения задачи, состоящее из указанных элементов. Дается полное описание строения решения, которое существует и единственно, при всех возможных параметрах задачи.

Первым в последовательности волн идет фронт затвердевания. Исследование показало, что определение множества состояний за ним принадлежит к тому типу задач, когда соотношений, следующих их законов сохранения, оказывается недостаточно для однозначного решения. Дополнительные соотношения обычно получаются из требования существования структуры такого разрыва, что обеспечивает его эволюционность. Проведенное для всех возможных скоростей фронта затвердевания исследование показало, что множество состояний

за разрывом (ударная адиабата в фазовом пространстве деформаций) оказалось состоящим из частей различной размерности. Для каждой из них задача об упругих волнах, следующих за фронтом затвердевания, решена отдельно и дана полная картина изменения параметров в них.

Отметим, что в решении задачи в определенных случаях могут отсутствовать быстрые или и быстрые, и медленные упругие волны. Фронт затвердевания при этом приобретает дополнительные степени свободы, так что число свободных параметров, от которых зависит решение, остается прежним, что позволяет в каждом из таких случаев получать однозначное решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликовский А. Г., Свешникова Е. И. *Нелинейные волны в упругих средах*. М.: Моск. Лицей, 1998.
2. Куликовский А. Г., Свешникова Е. И. *Образование анизотропной упругой среды на фронте уплотнения потока частиц*. ПММ. 2015. Т. 79. В. 6. С. 739–755.

ИНИЦИАЦИЯ ТРЕЩИНЫ В ВЕРШИНЕ ОСТРОГО V-ОБРАЗНОГО ВЫРЕЗА ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПО II МОДЕ

В. Д. Кургузов, А. Г. Демешкин

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

В классической механике разрушения силовые и деформационные критерии разрушения ориентированы на их применение к областям, содержащим трещины. Оценке хрупкой прочности областей с трещинами при нагружениях, соответствующих трем классическим типам трещин, посвящено большое количество работ. В то же время влияние угловых вырезов на величину разрушающей нагрузки изучено недостаточно. Это объясняется прежде всего тем обстоятельством, что все известные критерии разрушения не приспособлены к угловым точкам. Следует отметить, однако, что в инженерной практике такого рода проблематика встречается достаточно часто.

Проведено экспериментальное исследование зарождения трещины в вершине острого V-образного выреза. Рассмотрен антисимметричный изгиб плоского образца прямоугольного поперечного сечения, ослабленного V-образным вырезом, т.е. при нагружении по чистой II моде. Проведены эксперименты по разрушению образцов с V-образным вырезом из оргстекла и эбонита. Получены зависимости критической нагрузки от локации, глубины и угла раствора V-образного выреза. В условиях маломасштабной текучести при наличии сингулярной особенности поля напряжений в окрестности вершины V-образного выреза сформулирован трехпараметрический критерий квазихрупкого разрушения для V-образного выреза в нелинейно упругом материале. Деформационный критерий разрушения сформулирован в вершине углового выреза, а силовой критерий для касательных напряжений с учетом осреднения сформулирован в вершине модельной трещины. Глубина выреза и длина модельной трещины отличаются на длину зоны предразрушения. Выполнен последовательный анализ возможности применения предложенного критерия прочности при определении разрушающих нагрузок для тел, содержащих угловые вырезы.

Методом конечных элементов проведено компьютерное моделирование зарождения и развития трещины из вершины V-образного выреза. Выполнено численное моделирование распространения трещин в плоских образцах при квазистатическом нагружении. В окрестности вершины выреза возникают большие деформации, поэтому задача решалась в текущей лагранжевой постановке с учетом физической и геометрической нелинейности на основе общих уравнений механики деформируемого твердого тела с использованием в качестве меры напряжений тензора напряжений Коши, а в качестве меры деформаций – тензора логарифмических деформаций Генки. Установлено, что результаты численных экспериментов хорошо согласуются с результатами расчетов по аналитической модели разрушения материалов со структурой при антисимметричном изгибе в режиме маломасштабной текучести. Получено качественное соответствие данных эксперимента и результатов численных расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00342).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЛИ ПРОТЕКАНИИ ЧЕРЕЗ НЕЁ СЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ

В. Б. Курзин

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

Одной из острых проблем, имеющих место при создании и эксплуатации конструкций, через которые протекает или истекает из них сжимаемая среда, является возникновение интенсивных акустических колебаний. Например, подобные явления возникают в камерах сгорания реактивных двигателей твердого топлива и в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью. Основные предположения о механизме этого явления связаны с неустойчивостью вихревой пелены типа Кельвина-Гельмгольца, возникающей при истечении струи из соответствующих областей. Акустические колебания в камере рассматриваются как вынужденные колебания. Однако экспериментально было установлено, что в большинстве случаев эти колебания происходят с частотами, близкими к собственным частотам акустических колебаний в соответствующих областях.

Представленная работа основана на предположении о том, что механизм возникновения интенсивных акустических колебаний может быть связан с неустойчивостью собственных акустических колебаний в рассматриваемой области, которые в этом случае можно интерпретировать как автоколебательный процесс. Источником энергии этого процесса является стационарная составляющая основного потока, при истечении которого возникает вихревая пелена. При акустических колебаниях возникает и нестационарная составляющая интенсивности вихревой пелены, которая индуцирует нестационарное вихревое движение жидкости. В виде обратной связи через поверхность рассматриваемой области возникают и дополнительные акустические колебания в этой области.

В предположении о цилиндрической форме отверстия, через которое истекает жидкость, построена математическая модель для определения акустического импеданса в этом сечении. Оказалось, что составляющая акустического импеданса, определяющая энергетическое взаимодействие акустических колебаний с вихревой пеленой, имеет противоположный знак с

соответствующей составляющей импеданса, определяющей потери акустической энергии на излучение из открытого конца. Таким образом, по терминологии теории колебаний, в рассматриваемом случае имеет место положительная обратная связь. Величина этой энергии пропорциональна скорости истечения жидкости. При достижении определенной ее величины собственные колебания в рассматриваемых областях могут быть неустойчивыми. Сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными, опубликованными в ж. *Aeroacoustics*, показало хорошее их соответствие.

О СУЩЕСТВОВАНИИ ГЛОБАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МЕХАНИКИ СМЕСЕЙ ВЯЗКИХ СЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Н. А. Кучер, А. А. Жалнина

Кемеровский государственный университет

Рассматривается нелинейная система составного типа, описывающая пространственные нестационарные баротропные движения смесей вязких сжимаемых жидкостей [1, 2]

$$\partial_t(\rho_i \vec{u}^{(i)}) + \operatorname{div}(\rho_i \vec{u}^{(i)} \otimes \vec{u}^{(i)}) + \nabla p_i = \operatorname{div} \sigma^{(i)} + (-1)^{i+1} a(\vec{u}^{(2)} - \vec{u}^{(1)}) \text{ в } Q_T, \quad (1)$$

$$\partial_t(\rho_i) + \operatorname{div}(\rho_i \vec{u}^{(i)}) = 0 \text{ в } Q_T = (0, T) \times \Omega, i = 1, 2, \quad (2)$$

$$\sigma^{(i)} = \sum_{j=1}^2 [\mu_{ij} (\nabla \vec{u}^{(j)} + (\nabla \vec{u}^{(j)})^T) + \lambda_{ij} \operatorname{div}(\vec{u}^{(j)}) \cdot I]. \quad (3)$$

Здесь $\Omega \subset R^3$ - ограниченная область евклидова пространства точек $x = (x_1, x_2, x_3)$ с достаточно гладкой границей, заполненная бинарной смесью жидкостей, состояние которой характеризуется распределениями плотностей $\rho_i(t, x)$, давлений $p_i(t, x)$ и полями скоростей $\vec{u}^{(i)}(t, x)$ составляющих компонентов. Предполагается, что давление p_i и плотность ρ_i в i -той компоненте связаны соотношением $p_i = \rho_i^{\gamma_i}$, где γ_i - показатель адиабаты.

Уравнения (1) и (2) дополняются начальными условиями

$$\rho_i|_{t=0} = \rho_i^0, \quad \rho_i \vec{u}^{(i)}|_{t=0} = \vec{q}_0^{(i)} \text{ в } \Omega, i = 1, 2, \quad (4)$$

и граничными условиями

$$\vec{u}^{(i)} = 0 \text{ на } (0, T) \times \partial\Omega, i = 1, 2, \quad (5)$$

означающими, что граница области течения является неподвижной твердой стенкой.

Доказана теорема существования глобально определенного по времени обобщенного решения краевой задачи (1)-(5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Rajagopal K. R. *Mechanics of mixtures*. Singapore: World Sci., 1995.
2. Кучер Н. А., Мамонтов А. Е., Прокудин Д. А. *Стационарные решения уравнений динамики смесей вязких сжимаемых жидкостей*. Сибирский математический журнал. 2012. Т. 53. № 6(39). С. 1338–1353.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ МЕТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ КУМУЛЯТИВНЫМИ ОБЛИЦОВКАМИ ПОЛУСФЕРА-ЦИЛИНДР

С. В. Ладов, Я. М. Никольская, С. В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кумулятивные заряды с облицовкой комбинированной формы полусфера-цилиндр (ПЦ-облицовкой) позволяют формировать высокоскоростные компактные элементы (ВКЭ) и используются при проведении экспериментальных исследований поведения материалов и защитных конструкций в условиях высокоинтенсивного кинетического воздействия. Однако, полученные скорости метания компактных элементов из стали не превышают 6 км/с [1].

На основе численного моделирования исследовано формирование ВКЭ из ПЦ-облицовок усовершенствованной формы, придававшейся им с учетом результатов [2]. Их отличительной особенностью являлась дегрессивность (уменьшение от вершины к основанию) толщины струеобразующей части с изменением ее формы с полусферической на полуэллипсоидную. По результатам численных расчетов были определены геометрические параметры усовершенствованной ПЦ-облицовки, позволяющие сформировать ВКЭ с скоростями в диапазоне 7...10 км/с.

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена опытная партия ПЦ-облицовок дегрессивной толщины с использованием технологии штамповки пластичным металлом (свинцом) из заготовки в форме диска переменной толщины. Для соответствующих вариантов ПЦ-облицовок по результатам рентгенографических исследований были зарегистрированы лидирующие частицы струйного течения материала, движущиеся со скоростью в диапазоне 7,1...8,6 км/с, и рассеивающееся облако более мелких частиц на некотором удалении от лидирующей частицы (различие от расчетных данных не превышало 4...6 %).

В целом переход на ПЦ-облицовки усовершенствованной формы позволил повысить скорость ВКЭ из стали не менее, чем на 30 % по сравнению со “стандартной” ПЦ-облицовкой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания по разделу “Инициативные научные проекты” (код проекта 9.5330.2017 (БЧ)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов И. В., Князев А. С., Маляров Д. В. *Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств*. Труды Томского государственного университета. Т. 276. Серия физико-математическая. Томск: Изд-во Томского университета, 2010. С. 193–195.
2. Федоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В. *Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов*. Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 150–164.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СПЛАВОВ В95пчТ2 и В95очТ2 (Al-Zn-Mg-Cu)

А. Ю. Ларичкин¹, К. В. Захарченко^{1,2}, Б. В. Горев¹, В. И. Капустин², Е. А. Максимовский³

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

²Новосибирский государственный технический университет

³Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

Проведен анализ влияния условий технологического процесса формообразования панели сложной геометрии на усталостную долговечность плоских образцов из алюминиевых сплавов В95очТ2 (плита $h = 15$ мм) и В95пчТ2 (плита $h = 36$ мм) (зарубежные аналоги 7475 и 7175Т76).

Проведено экспериментальное моделирование процесса на плоских образцах для температур $T = 20, 165, 420^\circ\text{C}$. Процесс включает в себя: пластическое деформирование в диапазоне скоростей от $10^{-5} - 8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ до 2% относительной деформации, с последующей термообработкой по режиму Т2 (закалка и старение). Испытания на усталостную долговечность проводились, как на сплошных образцах, так и на образцах с отверстием. Показано влияние параметров процесса на количество циклов до разрушения. Показано, что сопротивление усталостному разрушению не уменьшается после предварительного деформирования при $T = 420^\circ\text{C}$. Анализ мезо-структуры показал отсутствие напряжения в зернах. Установлено, что в среднем форма зерен одинакова по сериям образцов для различных температур и скоростей нагружений.

Результаты испытаний образцов с отверстием показали незначительное уменьшение усталостной долговечности образцов, предварительно деформированных при $T = 420^\circ\text{C}$, по отношению к долговечности образцов из материала в состоянии поставки (рис.). При увеличении скорости предварительного деформирования наблюдается рост относительного числа циклов до разрушения.

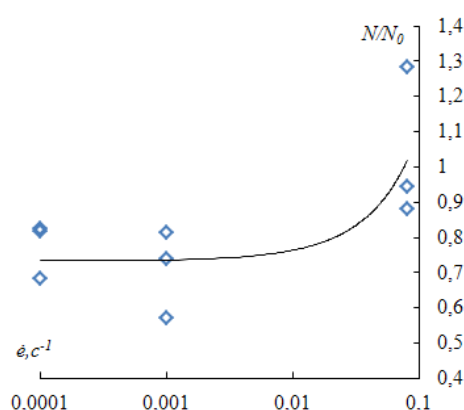


Рис. Зависимость относительного числа циклов до разрушения от скорости предварительной деформации. Образцы с отверстием из В95пчТ2

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-08-00713, 16-31-00460).

УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИЕЙ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С СУЖЕНИЕМ

В. А. Левин^{1,2}, Т. А. Журавская¹

¹ НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

² ИАПУ ДВО РАН, Владивосток

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, исследовано детонационное горение стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в плоский симметричный канал с сужением (пережатием). Цель изучения — определение условий, обеспечивающих стабилизацию волны детонации, и выявление механизмов управления ее положением в потоке.

Продолжая исследования [1], [2], в работе рассмотрена стабилизация инициируемой энергоподводом детонационной волны в канале с сужением, выходное сечение которого больше входного. Определены условия, обеспечивающие формирование в канале создающего тягу течения со стабилизированной волной детонации. Изучено влияние изменений числа Маха входящего потока M_0 , запыленности поступающей в канал горючей смеси и размера выходного сечения на положение стабилизированной в потоке волны. Предложены некоторые способы управления детонацией, позволяющие повышать эффективность детонационного сжигания газовой смеси. Установлена возможность формирования в рассматриваемом канале создающего тягу течения со стабилизированной волной детонации без затрат энергии.

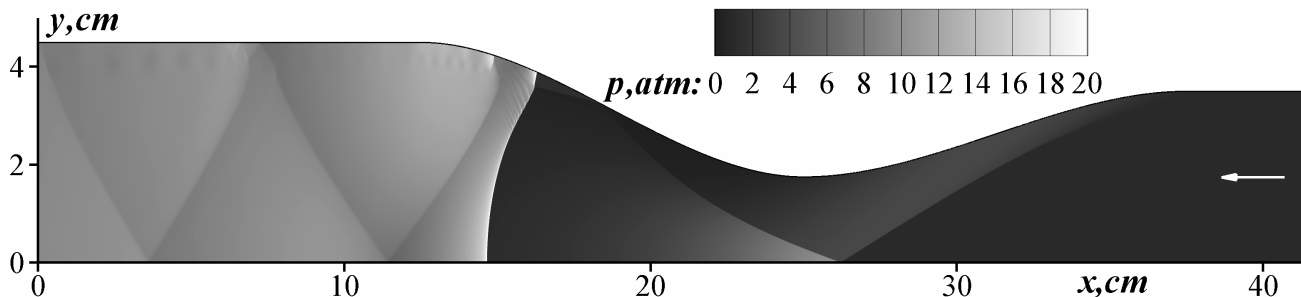


Рис. Стабилизация детонации в плоском канале с сужением при $M_0=4.9$

Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 16-29-01092), Министерства образования и науки РФ (НС-8425.2016.1). Разработка программного комплекса и изучение детонационного горения запыленной газовой смеси выполнены при поддержке РФФИ (коды проектов 14-19-01759, 14-11-00773 соответственно). Исследования выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавская Т. А., Левин В. А. *Исследование некоторых способов стабилизации детонационной волны в сверхзвуковом потоке*. МЖГ. 2012. №6. С. 126–136.
2. Журавская Т. А., Левин В. А. *Устойчивость течения газовой смеси со стабилизированной детонационной волной в плоском канале с сужением*. МЖГ. 2016. №4. С. 120–129.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ГИДРОРАЗРЫВОМ

М. А. Леган^{1,2}, В. А. Блинов¹, А. Ю. Ларичкин¹, А. Н. Новоселов¹

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

²Новосибирский государственный технический университет

На установке, создающей высокое давление масла, проведено экспериментальное исследование гидроразрыва толстостенных цилиндров с центральным круговым отверстием. Цилиндры были изготовлены из материала на основе цемента с полимерными добавками (самовыравнивающийся пол GF-177). Наличие полимерных добавок обеспечивает отсутствие усадки и растрескивания материала при затвердевании. Цилиндрические образцы имели диаметр 105 мм и высоту 100 мм. Вдоль оси образца просверливалось центральное отверстие диаметром 10,5 мм. Таким образом, образец представлял собой толстостенный цилиндр с отверстием, диаметр которого в 10 раз меньше диаметра цилиндра. Нагружение образца внутренним давлением осуществлялось в условиях плоской деформации. Получено значение предельного растягивающего окружного напряжения в условиях чистого сдвига на поверхности отверстия.

С помощью метода граничных элементов (в варианте метода фиктивных нагрузок) и градиентного критерия разрушения проведено моделирование процесса гидроразрыва при изменении диаметра отверстия, т.е. с учетом масштабного фактора. Согласно градиентному критерию для определения начала разрушения сравнивать с пределом прочности материала σ_b нужно не максимальное значение принятого эквивалентного напряжения σ_ν , а максимальное значение эффективного напряжения σ_e . Эффективное напряжение пропорционально эквивалентному напряжению и, кроме того, зависит от локальной неравномерности поля напряжений в окрестности рассматриваемой точки и представительного размера L_1 неоднородности материала, характеризующего его дефектность. В качестве параметра локальной неравномерности распределения напряжений используется относительный градиент $g_\nu = |\text{grad } \sigma_\nu| / \sigma_\nu$ эквивалентного напряжения. Размер L_1 , характеризующий дефектность материала, находится из условия согласования градиентного критерия разрушения с теорией трещин и выражается через две стандартные характеристики материала — предел прочности σ_b и критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} .

Разработана методика вычисления относительного градиента в окрестности контура отверстия при использовании метода граничных элементов. При разработке этой методики основная проблема состояла в достижении высокой точности вычисления напряжений вблизи контура отверстия. Указанная проблема успешно решена. Проведено сравнение результатов расчетов предельного давления со значениями, полученными аналитически на основе решения Ламе, и экспериментальными данными. Также проведено сравнение результатов расчетов по градиентному критерию с результатами, полученными по критерию разрушения по напряжению в удаленной точке (критерию Нуизмера).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-08-00713 и 15-01-07631).

ОБРАЗОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ТРЕЩИН В СТЕКЛЕ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

М. А. Леган^{1,2}, А. Н. Новоселов¹, Н. В. Федорова^{1,2}

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

²Новосибирский государственный технический университет

Приведены результаты экспериментов по вдавливанию стальных шаров различного диаметра в стеклянные образцы, моделирующие полупространство. В качестве индентора применялись шары диаметром 3,14; 3,94; 5,5; 10; 12 и 17 мм, изготовленные из подшипниковой стали ШХ15. Стеклянные образцы в форме прямоугольного параллелепипеда были изготовлены из листового натрий-кальций-силикатного стекла марки М1 толщиной 10 мм и имели размеры в плане 20 мм на 20 мм.

Эксперименты проводились на испытательной машине Zwick/Roell Z100. Нагружение заканчивалось после появления кольцеобразной трещины вокруг области контакта шара с образцом. Образование кольцеобразной трещины фиксировалось с помощью оптического микроскопа, передающего изображение окрестности области контакта на экран компьютера в режиме реального времени. Микроскоп устанавливался под стальную защиту, на которой находился стеклянный образец. Объектив был направлен в центр сквозного отверстия в крышке защиты.

В результате экспериментов получены предельные усилия, при которых возникает кольцеобразная трещина. По теории контактного взаимодействия Герца получены оценки радиуса области контакта. Эти оценки оказались на порядок меньше радиусов шаров и толщины стеклянных образцов, что удовлетворяет условиям применения теории Герца. Поэтому для анализа экспериментальных результатов использованы решения задачи о вдавливании шара в упругое полупространство, полученные Герцем и Хубером.

С помощью инструментального микроскопа определены радиусы трещин. Интересно отметить, что практически во всех экспериментах радиус трещины превышает радиус области контакта, на границе которой согласно теоретическому решению достигается максимальное растягивающее радиальное напряжение. Поэтому для анализа контактного разрушения при вдавливании шара в упругое хрупкое полупространство использованы нелокальные критерии предельного состояния: критерий средних напряжений, критерий Нуизмера и градиентный критерий разрушения.

С помощью локального критерия максимальных напряжений и нелокальных критериев разрушения получены оценки радиусов кольцеобразных трещин и предельного растягивающего напряжения. Сравнение полученных оценок с экспериментальными данными по разрушению стекла показывает, что локальный критерий дает заниженные оценки радиусов трещин и существенно завышенную оценку предельного напряжения. Критерий средних напряжений и критерий Нуизмера, наоборот, дают существенно завышенные оценки радиусов трещин и существенно заниженные оценки предельного напряжения. По сравнению с указанными критериями градиентный критерий дает оценки, более близкие к экспериментальным данным. При этом оценки радиусов трещин получаются заниженными, а оценка предельного напряжения — завышенной по сравнению с пределом прочности стекла при изгибе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-08-00713 и 15-01-07631).

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧИ МАГНИТНОЙ МАСКИРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХСЛОЙНОЙ МАСКИРОВОЧНОЙ ОБОЛОЧКИ

А. В. Лобанов

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

В 2006 году вышла основополагающая работа [1] в области маскировки материальных тел. В ней на основе принципа оптических преобразований было предложено устройство невидимости в виде маскировочной оболочки, которое может скрывать объекты от волн различной природы. Далее был опубликован цикл работ [2–4], посвященный маскировке материальных тел в случае статических магнитных полей, основанный на магнитостатическом аналоге метода оптических преобразований. В цитируемых работах было установлено, что необходимым условием идеальной работы такого устройства является анизотропия и сингулярность материальных параметров соответствующей маскировочной оболочки, в частности, тензорных компонент магнитной проницаемости в случае магнитостатических полей. Поскольку техническая реализация указанных параметров невозможна, то были предложены различные схемы, служащие для преодоления указанных недостатков [4, 5]. Один из способов состоит в использовании двухслойной (цилиндрической или сферической) маскировочной оболочки, состоящей из двух слоев, заполненных однородными изотропными средами с различными постоянными магнитными проницаемостями.

В работе рассматривается задача маскировки материальных тел относительно статических магнитных полей с использованием двухслойной маскировочной оболочки в случае, когда внешне приложенное поле не является однородным. Для решения указанной задачи применяется оптимизационный метод, развитый в [5]. На основе указанного подхода и эволюционного алгоритма, а именно: классического алгоритма роя частиц, развивается эффективный численный алгоритм решения рассматриваемой задачи маскировки. Алгоритм основан на выборе магнитных проницаемостей μ_1 и μ_2 каждого слоя проектируемой оболочки путем решения задачи минимизации. В заключение обсуждаются результаты проведенных численных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00365-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Pendry J. B., Shurig D., Smith D. R. *Controlling electromagnetic fields*. Science. 2006. V. 312. Pp. 1780–1789.
2. Magnus F., Wood B., et al. *A d.c. magnetic metamaterial*. Nature Materials. 2008. V. 7. Pp. 295–297.
3. Sanchez A., Navau C., Prat-Camps J., Chen D. X. *Antimagnets: controlling magnetic fields with superconductor metamaterial hybrids*. New J. Phys. 2011. V. 13. № 093034.
4. Gomory F., Solovyov M. *Experimental realization of a magnetic cloak*. Science. 2012. V. 335. Pp. 1466–1468.
5. Алексеев Г. В. *Проблема невидимости в акустике, оптике и теплопереносе*. Владивосток: Дальнаука, 2016.

ТЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ СРЕД: ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Н. А. Луценко

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

Тление представляет собой медленное беспламенное горение, при котором распространяется самоподдерживающаяся волна экзотермической реакции гетерогенного окисления твердого топлива [1]. При тлении реакция между кислородом и конденсированным горючим веществом происходит непосредственно на поверхности топлива, то есть горючее и окислитель находятся в разных фазах, поэтому такое горение является гетерогенным. Тление в пористых средах может устойчиво распространяться даже при высокой влажности и низкой калорийности горючего материала, поэтому очаги тления, возникающие в пористых объектах природного и техногенного происхождения (торф, полигоны ТБО и т.д.), чрезвычайно сложно ликвидировать, в результате чего они приносят огромный экологический вред (из-за обильно выделяющихся токсичных газов) и материальный ущерб.

Настоящая работа посвящена численному моделированию тления пористых сред при естественной конвекции, то есть когда заранее не известен расход проходящего через объект газа. Предложенная математическая модель основана на классических подходах механики сплошных гетерогенных сред [2] и теории фильтрационного горения [3] и является развитием разработанной ранее модели гетерогенного горения пористых сред [4,5]. Оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем, в настоящей работе проверяется на способность давать результаты верные не только качественно, но и количественно. С этой целью проводится сравнение расчетных данных с экспериментальными данными по тлению пенополиуретана при естественной конвекции [6], при этом используются некоторые параметры тления полиуретановой пены из [7]. Расчеты показали, что при моделировании встречного горения (волна тления движется вниз) численная модель позволяет получать почти полное количественное совпадение с экспериментом. При моделировании спутного горения (волна тления движется вверх) численная модель оказывается сильно чувствительной к точности задания некоторых параметров, значения которых не удалось точно определить из используемых источников, поэтому появляется заметная погрешность в расчетных данных. Тем не менее, проведенные вычислительные эксперименты вселяют надежду, что при точном определении параметров численная модель в состоянии очень точно описывать различные режимы тления пористых сред при естественной конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00103-а), ДВО РАН (проект 15-I-4-021).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ohlemiller T. J. *Modeling of smoldering combustion propagation*. Progress in Energy and Combustion Science. 1985. V. 11 (4). Pp. 277–310.
2. Нигматулин Р. И. *Основы механики гетерогенных сред*. М.: Наука, 1978. .
3. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. *Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований*. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9–52.
4. Lutsenko N. A. *Modeling of Heterogeneous Combustion in Porous Media under Free Convection*. Proceedings of the Combustion Institute. 2013. V. 34. No. 2. Pp. 2289–2294.

5. Lutsenko N. A., Levin V. A. *Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media*. Combustion Science and Technology. 2014. V. 186. No. 10-11. Pp. 1410–1421.
6. Torero J. L., Fernandez-Pello A. C., Kitano M. *Opposed forced flow smoldering of polyurethane foam*. Combustion science and technology. 1993. V. 91 (1-3). Pp. 95–117.
7. Ohlemiller T. J., Bellan J., Rogers F. *A model of smoldering combustion applied to flexible polyurethane foams*. Combustion and Flame. 1979. V. 36. Pp. 197–215.

О ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ОДНОМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ЧЕРЕЗ СЛОЙ КАПСУЛИРОВАННОГО ПЛАВЯЩЕГОСЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

Н. А. Луценко, С. С. Фецов

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Для накопления тепловой энергии с последующим возвратом, для термальной защиты и увеличения термальной инертности широко применяются тепловые аккумуляторы [1]. С целью увеличения плотности накапливаемой энергии в этих устройствах активно используются плавящиеся теплоаккумулирующие материалы (ТАМ), которые выделяют и поглощают большое количество теплоты в результате фазовых переходов [1, 2]. Одним из эффективных способов компоновки теплового аккумулятора является засыпка некоторого объема мелкими капсулами сферической формы, которые содержат внутри себя плавящийся ТАМ и нагреваются (охлаждаются) проходящим через объем теплоносителем (жидкостью или газом) [3]. В случае относительно малого размера используемых капсул такие тепловые аккумуляторы можно представить как пористые объекты, насыщенные жидкостью или газом, и рассматривать их с точки зрения механики сплошных гетерогенных сред [4].

В настоящей работе на основе предложенных и апробированных в [5, 6] математической модели и численного метода для исследования одномерных нестационарных процессов газового охлаждения пористых тепловыделяющих объектов предложена численная модель для описания одномерных нестационарных процессов при движении газа через слой капсулированного плавящегося ТАМ при заданном перепаде давлений на границах слоя. Преимуществом разработанного вычислительного алгоритма является то, что он не требует выделения зоны фазового перехода во время вычислений, автоматически рассчитывая ее в процессе сквозного счета. Фазовый переход учитывается в уравнении внутренней энергии твердой среды в виде слагаемого с неизвестной функцией f , которая равна степени фазового превращения в рассматриваемой точке среды. Эта функция равна 0 и 1, соответственно, до и после фазового перехода и изменяется во время него. Из уравнения энергии твердой среды определяется ее температура до и после фазового перехода, а во время фазового перехода (когда температура твердой среды фиксирована) вычисляется значение f .

Предложенный в настоящей работе численный метод реализован и апробирован на задачах продувки слоя капсулированного плавящегося ТАМ газовым теплоносителем при заданном перепаде давлений на границах слоя. Результаты расчетов показали хорошее соответствие с результатами работы [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00103-а), ДВО РАН (проект 15-I-4-021).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zalba S., Marin J. M., Gabeza L. F., Mehling H. *Review of thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Appl. Therm. Energy. 2003. V. 23. Pp. 251–283.
2. Bedecarrats J. P., Castaing-Lasvignottes J., Strub F., Dumas J. P. *Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part I: Experimental results*. Energy Conversion and Management. 2009. V. 50. Pp. 2527–2536.
3. Bedecarrats J. P., Strub F., Falcon B., Dumas J. P. *Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant*. Int. J. Refrig. 1996. V. 19. № 3. Pp. 187–196.
4. Нигматулин Р. И. *Основы механики гетерогенных сред*. М.: Наука, 1978.
5. Луценко Н. А. *Нестационарные режимы охлаждения пористого тепловыделяющего элемента*. Математическое моделирование. 2005. Т. 17. № 3. С. 120–128.
6. Левин В. А., Луценко Н. А. *Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа*. Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 1. С. 35–40.
7. Теплицкий Ю. С., Рослик А. Р. *О нестационарных процессах теплопереноса в слое мелко-дисперсных капсул при наличии фазового перехода*. Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 6. С. 1297–1306.

О НОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ ПСЕВДОПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ

А. Ш. Любанова

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Появление новых моделей фильтрации, учитывающих внутренние взаимодействия в сложных средах, дало толчок развитию качественной теории обратных и нелокальных задач для неклассических уравнений типа фильтрации. К таким уравнениям относятся, в частности, псевдопараболические и параболические, а также связанные с ними стационарные уравнения и системы. Настоящая работа посвящена некоторым новым классам коэффициентных задач для псевдопараболических уравнений типа фильтрации слабосжимаемых жидкостей в трещиноватых средах (почвах, нефтяных пластах и др.). Такие среды представляют собой систему пористых блоков и трещин между ними.

Г. И. Баренблаттом, Ю. П. Желтовой и И. Н. Кочиной было дано строгое математическое обоснование модели нестационарной фильтрации слабосжимаемой жидкости в трещиноватой среде

$$\frac{\partial}{\partial t}(u - \eta \Delta u) - k \Delta u = f, \quad (1)$$

где $u = u(t, x)$ — давление жидкости в трещинах; Δ — оператор Лапласа, $\eta = \nu/\alpha$, $k = \frac{\nu}{\mu}(m_0 d_1 + d_2)^{-1}$, d_1 и d_2 — коэффициенты сжимаемости жидкости и блоков; m_0 — пористость

блоков при стандартном давлении; μ — вязкость жидкости; ν — коэффициент проницаемости трещин. Безразмерный коэффициент α характеризует интенсивность обмена жидкостью между блоками и трещинами.

Более сложные модели фильтрации в трещиноватых средах вида

$$\frac{\partial}{\partial t}(u - \operatorname{div}(\bar{\psi}_1(t, x, u, \nabla u))) - \operatorname{div}(\bar{\psi}_2(t, x, u, \nabla u)) = f \quad (2)$$

учитывают нелинейную зависимость проницаемости и гидравлических свойств системы от давления (или содержания) жидкости в трещинах и порах, в частности, эффект динамического капиллярного давления. Здесь $\bar{\psi}_i(t, x, u, p)$ — заданные вектор-функции, $i = 1, 2$.

Свойства и структура трещиноватой среды могут меняться со временем и зависят от естественных условий залегания пласта, которые практически невозможно воссоздать в лабораторных условиях с необходимой точностью. Поэтому параметры среды следует определять на основе дополнительной информации о поведении среды в естественных условиях, а не на базе лабораторных экспериментов. Это объясняет интерес к обратным задачам для уравнений фильтрации.

В данной работе обсуждаются новые постановки обратных задач отыскания коэффициентов в старших членах уравнений (1) и (2) с интегральными условиями переопределения на границе рассматриваемого объема трещиноватой породы. В частности, исследование гидравлических свойств среды приводит к обратной задаче отыскания неизвестного коэффициента k в уравнении (1). При определении интенсивности обмена жидкостью между порами и трещинами возникает обратная задача идентификации неизвестного коэффициента η .

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОТЕКАНИЯ ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СПАЯ СТЕКЛО-СТАЛЬ

О. Н. Любимова, А. В. Морковин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

При получении соединения стекла со сталью в технологии изготовления нового конструкционного материала стеклометаллокомпозита [1] методом пайки в зоне соединения возникает новый материал — стекло насыщенное железом (диффузионная зона). Отметим, что в целом образование соединения стекло-сталь включает три этапа: формирование физического контакта; зарождение и развитие активационных центров и объемные диффузионные процессы. Целью данной работы является описание и математическое моделирование диффузионных процессов: механизма образования, структуры и свойств диффузионной зоны.

При проведении экспериментальных исследований замечено, что причиной и непосредственным участником диффузионных процессов является оксидный слой на стальной поверхности [2]. От его геометрических (толщины) и химических (состав оксидов железа вюстит, магнетит и т.д.) характеристик существенно зависит кинетика образования диффузионной зоны. В зависимости от технологического режима выделяются два основных механизма диффузии. Особенностью первого является наличие двух разных по концентрации и структуре фаз: малой толщины (до 5 мкм) кристаллической с высоким содержанием железа и более протяженной (до 150 мкм) аморфной с более низким содержанием железа. Во втором случае наблюдается только одна аморфная фаза, в которой концентрация железа равномерно убывает по мере удаления от зоны соединения. Разные механизмы требуют по существу различных

подходов к моделированию диффузионных процессов, позволяющих учитывать возможность реализации разнородных условий на границах разных фаз. Моделирование концентрационных профилей в диффузионном слое позволит прогнозировать эволюцию его структуры и геометрии и оптимизировать технологические параметры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пикуль В. В. *К созданию композиционного наноматериала на базе стекла*. Перспективные материалы. 2008. № 3 С. 78.
2. Olga N. Lyubimova, Andrey V. Morkovin, Sergey A. Dryuk, and Pavel A. Nikiforov. *Structure and constitution of glass and steel compound in glass-metal composite*. AIP Conference Proceedings. 2014. № 1623. Pp. 379.

О КАЧЕСТВЕННЫХ СВОЙСТВАХ ВОЗМУЩЕННЫХ СВЕРХУСТОЙЧИВЫХ ЛИНЕЙНЫХ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. А. Люлько^{1,2}, I. Y. Kmit³

¹Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Institute of Mathematics, Humboldt University, Berlin

Линейная система

$$\frac{d}{dt}u(t) = A(t)u(t), \quad u(0) \in X \quad (0 < t < \infty), \quad (1)$$

рассматриваемая в банаховом пространстве X , называется асимптотически устойчивой с показателем $\gamma > 0$, если существует число $M > 0$ такое, что для всех решений u этой системы при $t \geq 0$ справедлива оценка $\|u(t)\| \leq Me^{-\gamma t}\|u(0)\|$. Система (1) называется *сверхустойчивой*, если она асимптотически устойчива с любым показателем $\gamma > 0$, т. е. все решения u этой системы убывают быстрее экспоненты в любой степени [1].

Для линейной гиперболической системы первого порядка рассмотрим в полуполосе $\Pi = \{(x, t) : 0 < x < 1, t > 0\}$ смешанную задачу, которую запишем в виде системы (1), где u — n -мерная вектор-функция и

$$A(t) : L^2(0, 1) \longrightarrow L^2(0, 1) : \quad (A(t)u)(x) = a(x, t)u_x + b(x, t)u,$$

$$D(A(t)) = \{u \in L^2(0, 1) : u_x \in L^2(0, 1), P(u(0, t), u(1, t)) = 0\}.$$

Здесь a, b — гладкие матрицы размерности $n \times n$, P — линейный оператор, задающий граничные условия на боковых сторонах Π ; $n \geq 2$. В [2] выделен класс гиперболических линейных сверхустойчивых задач, все решения которых стабилизируются к нулю за конечное время, не зависящее от начальных данных $u(0)$. Доказано, что при малом возмущении матрицы b возмущенные системы становятся асимптотически устойчивыми, при этом получена оценка на показатель экспоненциального убывания в зависимости от величины возмущения. Найдены условия, при которых возмущенные системы обладают свойством повышения гладкости решений по любым начальным данным $u(0) \in L^2(0, 1)$.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН (проект № 121 программы № 15 “Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы”).

ЛИТЕРАТУРА

1. Balakrishnan A. V. *Superstability of systems*. Applied Mathematics and Computation. 2005. Т. 164. № 2. Рр. 321–326.
2. Kmit I., Lyulko N. *Perturbations of superstable linear hyperbolic systems*. arxiv.org/abs/1605.04703. 2016. P. 24.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО
НАГРУЖЕНИЯ ОКИСЛОВ И СИЛИКАТОВ

К. К. Маевский

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

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения смесей с помощью термодинамически равновесной модели ТЕС (thermodynamic equilibrium components) [1]. Рассматриваются окислы и силикаты, а также их смеси. Модель позволяет учитывать возможность наличие полиморфного фазового перехода при ударно-волновом воздействии рассматриваемых материалов. Это существенно для достоверного моделирования термодинамических параметров как чистых веществ, так и смесей на их основе. Существенное изменение объема в области фазового перехода компонентов, входящих в состав смесей, позволяет расширить диапазон изменения термодинамических параметров смесей при ударно-волновом нагружении. Полученные результаты позволяют в перспективе целенаправленно создавать необходимые условия для синтеза новых материалов. При моделировании исследуемый материал в области фазового перехода рассматривается как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, такой подход позволяет достоверно описывать термодинамические параметры в области полиморфного фазового перехода [2]. Интерес к исследованиям сжимаемости таких смесей связан как с возможностью создания материалов с необходимыми свойствами, в частности, термостойкие и высокопрочные керамики, так и со свойствами самих материалов.

Получено хорошее соответствие данных расчетов по модели ТЕС с данными различных авторов определенными на основании экспериментов [3]. Данная модель используется для определения составов и соотношений компонентов смеси с целью получения заданных параметров сплошных и пористых материалов после воздействия ударными волнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинеловский С. А., Маевский К. К. *Модель поведения смеси с различными свойствами компонентов при высоких динамических нагрузках*. ПМТФ. 2013. Т. 54. Вып. 4. С. 716–723.
2. Кинеловский С. А., Маевский К. К. *Моделирование ударно-волнового нагружения многокомпонентных материалов, включающих в свой состав висмут*. ТВТ. 2016. Т. 54. Вып. 5. С. 716–723.
3. Кинеловский С. А., Маевский К. К. *Оценка термодинамических параметров ударно-волнового воздействия на высокопористые гетерогенные материалы*. Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 8. С. 125–130.

СИНТЕЗ И КОМПАКТИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО СПЕКАНИЯ

В. И. Мали, А. Г. Анисимов, М. А. Есиков, Д. В. Дудина

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

С развитием методов получения порошков различного размера, морфологии и состава особый интерес представляют неравновесные процессы компактирования, которые позволяют сохранить ценные характеристики материала, полученные в порошковом состоянии, а также контролировать процессы роста зерна и изменения фазового состава при получении объемного материала из порошка. Принцип электроискрового спекания заключается в пропускании импульсов постоянного электрического тока через пуансоны и пресс-форму из проводящих материалов; в случае проводящих образцов электрический ток проходит и через спекаемый компакт. Данный метод позволяет осуществлять быстрое спекание материалов, а также проводить синтез материалов из порошковых смесей одновременно с консолидацией.

Главным достоинством метода SPS является наличие высокой плотности тока на порошковых контактах, непосредственно через которые пропускаются импульсы постоянного электрического тока, что приводит к высокой скорости их нагрева и очищению от оксидов и сорбированных веществ на начальных стадиях спекания.

Указанные особенности метода позволяют спекать материалы при температурах значительно меньших температуры плавления, сократить время спекания и получить более высокие плотности, улучшенные механические и функциональные характеристики консолидированных материалов. Это позволило спечь порошки диборидов циркония и гафния, из которых получают ультравысокотемпературные керамические материалы (УВТК), работоспособные в экстремальных условиях при температурах $> 2000^\circ \text{C}$ в окислительной среде. Наиболее перспективными оказались порошковые композиции на основе диборида циркония, которые имели меньшую пористость и спекались при более низких температурах. Введение в порошок диборида циркония ультрадисперсных добавок оксида алюминия, оксида иттрия и карбида кремния позволило методом искрового плазменного спекания получить керамический материал общей пористостью менее 2% при температуре спекания $1630\text{--}1700^\circ \text{C}$. Образование при нагреве в керамическом материале фаз $\text{La}_2\text{O}_3 \bullet 2\text{ZrO}_2$, $\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, ZrSiO_4 способствовало повышению окислительной стойкости керамики за счет образования тугоплавкого газонепроницаемого барьера.

В данной работе на примерах систем $\text{Ti}_3\text{SiC}_2 - \text{Cu}$, $\text{NiO} - \text{Ni}$, $\text{Cu}_2\text{O} - \text{Cu}$, $\text{Fe} - \text{Al}$ и $\text{Ni} - \text{B}$ проведен анализ некоторых особенностей поведения смесей порошков металлов, реакционных металлосодержащих смесей и композитов с металлическими матрицами при электроискровом спекании.

Показана возможность получения композитов с металлическими матрицами, сочетающих различные механизмы упрочнения, методом электроискрового спекания. В композитах $\text{Ti}_3\text{SiC}_2 - \text{Cu}$, содержащих (3-5) об.% Ti_3SiC_2 и полученных электроискровым спеканием порошков, обработанных в мельнице в высокоэнергетическом режиме, наиболее существенным является суммарный вклад дислокационного и зернограничного упрочнения. Упрочнение по данным механизмам в спеченных композитах оказывается возможным благодаря тому, что при электроискровом спекании сохраняются высокие концентрации дефектов в медной матрице и ее нанокристаллическая структура.

На примере синтеза пористого алюминида железа $FeAl$ показано, что реакционное электроискровое спекание смесей порошков металлов без приложения давления позволяет получить пористые материалы с высокими значениями открытой пористости (40-46%).

Проведен сравнительный анализ структуры материалов, полученных реакционным электроискровым спеканием механически обработанной смеси и спеканием продукта теплового взрыва этой же смеси на примере синтеза бориды никеля Ni_3B из элементов. Показано, что при близком фазовом составе материал, полученный реакционным спеканием, имеет более дефектную структуру по сравнению с материалом, полученным спеканием продукта теплового взрыва.

Рассмотрены условия эффективного восстановления оксидных пленок, присутствующих на металлических частицах, в условиях электроискрового спекания. Установлено, что уменьшение концентрации оксидов при электроискровом спекании в режимах, обычно используемых при компактировании металлических порошков, не всегда связано с действием электрического тока, а в некоторых случаях определяется диффузией углерода материала оснастки или графитовой фольги в объем компакта при спекании и восстановлением оксидов металлов углеродом.

ГЛОБАЛЬНАЯ РАЗРЕШИМОСТЬ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ МНОГОСКОРОСТНЫХ СМЕСЕЙ

А. Е. Мамонтов, Д. А. Прокудин

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

Рассматривается модель многокомпонентных многоскоростных смесей. Для нее теоремы о глобальном существовании слабых решений многомерных задач были получены совсем недавно (см., например, [1]– [3]), благодаря чему состояние этой теории стало сопоставимо с таковым для однокомпонентных моделей. При этом открылись проблемы, характерные именно для смесей, и отличающие их принципиально от однокомпонентных моделей. В определенной степени эти трудности описаны в [4]. Для многих из них пока неясны пути преодоления.

Как и в многомерном случае, классические результаты для однокомпонентного вязкого газа не переносятся на многокомпонентный одномерный случай каким-то автоматическим образом, в частности, в силу принципиально иной структуры вязких членов — наличия недиагональной матрицы вязкостей. Это отличие по своей сложности не зависит от размерности движения. Корректность для моделей смесей с диагональной матрицей вязкостей в одномерном случае изучена в [5], [6].

В докладе будет представлена теорема о существовании и единственности сильного решения начально-краевой задачи о движении смеси с недиагональной матрицей вязкостей, будут обсуждаться перспективы и трудности дальнейшего развития теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучер Н. А., Мамонтов А. Е., Прокудин Д. А. *Стационарные решения уравнений динамики смесей вязких сжимаемых теплопроводных жидкостей*. Сиб. матем. журн. 2012. Т. 53. № 6. С. 1338–1353.

2. Мамонтов А. Е., Прокудин Д. А. *Разрешимость стационарной краевой задачи для уравнений движения однотемпературной смеси вязких сжимаемых теплопроводных жидкостей*. Изв. РАН. Сер. матем. 2014. Т. 78. № 3. С. 135–160.
3. Мамонтов А. Е., Прокудин Д. А. *Существование слабых решений задачи о трехмерных стационарных баротропных движениях смесей вязких сжимаемых жидкостей*. Сиб. матем. журн. 2017. Т. 58. № 1. С. 148–164.
4. Mamontov A. E., Prokudin D. A. *Viscous compressible multi-fluids: modeling and multi-d existence*. Methods Appl. of Anal. 2013. V. 20. № 2. Pp. 179–195.
5. Кажихов А. В., Петров А. Н. *Корректность начально-краевой задачи для модельной системы уравнений многокомпонентной смеси*. Динамика сплошной среды. 1978. Т. 35. С. 61–73.
6. Петров А. Н. *Корректность начально-краевых задач для одномерных уравнений взаимопроницающего движения совершенных газов*. Динамика сплошной среды. 1972. Т. 56. С. 105–121.

КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА С МЕНЯЮЩИМСЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

В. Г. Марков, С. В. Попов

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск

В работе рассматриваются вопросы разрешимости краевых задач для дифференциальных уравнений высокого порядка вида

$$\frac{\partial^{2m+1}u}{\partial t^{2m+1}} + \sum_{k=0}^{2m} \frac{\partial^k u}{\partial t^k} a_k(t) + Lu = f, \quad (1)$$

$$Lu \equiv \frac{1}{g(x)}(L_0u + \lambda_0u + Mu), \quad (x, t) \in Q = (a, b) \times (0, T),$$

где дифференциальный оператор L_0 — оператор по пространственной переменной $2n$ -го порядка, M — его возмущение, λ_0 — комплексный параметр, функция $g(x)$ может обращаться в нуль и менять знак на интервале (a, b) . Дополним уравнение (1) краевыми условиями

$$\sum_{k=0}^{2n-1} \alpha_{jk} \frac{\partial^k}{\partial x^k} u(a, T) + \sum_{k=0}^{2n-1} \beta_{jk} \frac{\partial^k}{\partial x^k} u(b, T) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 2n, \quad (2)$$

$$u^{(i)}(x, 0) = u^{(i)}(x, T), \quad i = 0, 1, \dots, 2m, \quad (3)$$

где α_{jk}, β_{jk} — некоторые комплексные постоянные.

Отметим, что подобные уравнения возникают во многих областях физики, механики и некоторых других их приложениях. Уравнения высокого порядка рассматривались в работах [1, 2]. Здесь рассматриваются вопросы разрешимости краевой задачи (1)–(3), в частности, при $m = 0$ для $2n$ -параболических уравнений с меняющимся направлением времени, исследуются

вопросы корректности краевых задач с полной матрицей условий сопряжения (склеивания) [3].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания НИР на 2017-2019 гг. (проект № 6069).

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров И. Е., Пятков С. Г., Попов С. В. *Неклассические операторно-дифференциальные уравнения*. Новосибирск: Наука, 2000.
2. Pyatkov S. G., Popov S. V., Antipin V. I. *On solvability of boundary value problems for kinetic operator-differential equations*. Integral Equations Operator Theory. 2014, V. 80, № 4. P. 557–580.
3. Попов С. В., Потапова С. В. *Гельдеровские классы решений $2n$ -параболических уравнений с меняющимся направлением эволюции*. ДАН. 2009. Т. 424, № 5. С. 594–596.

ПРИМЕНЕНИЕ ГРУППОВЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

П. В. Марков

*Тюменский государственный университет
ТюмФ ИТПМ СО РАН*

Доклад посвящен примерам применения полученных в предыдущих исследованиях [1–3] групповых классификаций непрерывных (дифференциальные уравнения) и дискретных моделей процессов фильтрации в пористых средах. В качестве дискретных моделей рассматриваются конечно-разностные схемы и дискретные динамические системы. Групповая классификация проводилась на основе непрерывных групп преобразований пространства \mathbb{R}^n .

Для групповой классификации дискретных динамических систем общего вида $\vec{x}_{k+1} = f(\vec{x}_k)$, где $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$, представлен пример двумерных систем для фрактальной капиллярной сети в виде треугольника Серпинского. Получено, что общий вид таких систем может быть сведен к одномерным системам. Также продемонстрирован подход к использованию групповой классификации [3] для доказательства наличия или отсутствия дополнительных непрерывных групп симметрий.

Для дифференциальных уравнений с частными производными

$$A(u) \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(B(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + C(u) \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

рассмотрены конечно-разностные схемы с непрерывными группами симметрий для случая $C \equiv 0$, который соответствует уравнению фильтрации газа в пористой среде, и случая $A \equiv 1$, который соответствует уравнению Рапопорта-Лиса [4]. Для упомянутых случаев приведены примеры конечно-разностных схем, которые относятся к одному из полученных ранее классов, а также продемонстрировано применение непрерывных групп симметрий для генерации численных решений [4].

Представлен пример явной конечно-разностной схемы уравнения Баклея—Леверетта, что соответствует случаю $A \equiv 1$ и $B \equiv 0$ в (1). Для конечно-разностной схемы данного уравнения показано, что она относится к одному из классов дискретных динамических систем, полученных в [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дородницын В. А. *Групповые свойства разностных уравнений*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
2. Лагно В. И., Спичак С. В., Стогний В. И. *Симметричный анализ уравнений эволюционного типа*. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
3. Марков П. В. *Групповая классификация дискретных динамических систем*. Нелинейная динамика. 2013. Т. 9. № 4. С. 641–649.
4. Марков П. В., Родионов С. П. *Метод ускорения серийных численных расчетов уравнений многофазной фильтрации в пористой среде с помощью непрерывных групп симметрий*. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 12. С. 23–30.

О ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИМЕСИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ЧЕРЕЗ ЗАМКНУТУЮ ОБЛАСТЬ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ СОРБЦИИ

Б. С. Марышев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

При фильтрации смеси через пористый фильтр частицы примеси взаимодействуют с твердым скелетом пористой среды, то есть течение осложняется сорбционными процессами — прилипанием и отрывом частиц примеси. Такие процессы могут вызывать пульсации концентрационного поля, что в свою очередь может приводить к существованию колебательной моды неустойчивости в задачах о концентративной конвекции [1, 2].

В настоящей работе решается задача об устойчивости пульсационного вертикального течения смеси в замкнутой прямоугольной области пористой среды с учетом сорбции примеси. Боковые границы области считаются непроницаемыми на верхней и нижних границах заданы поток примеси и скорость жидкости. Сорбция примеси учитывается в рамках нелинейной МММ модели с кинетикой сорбции второго порядка [3]. Ранее [2] было получено, что в спектре линейных возмущений стационарного вертикального течения присутствует колебательная мода. Взаимодействие колебательной моды неустойчивости с пульсациями внешнего потока определяет параметрический характер неустойчивости в рассматриваемой задаче.

Задача решена в приближении Дарси-Буссинеска. Получены линейные уравнения, описывающие эволюцию малых возмущений с учетом пульсаций потока. Исследование устойчивости проведено численно, методом дифференциальной прогонки [4]. Получены зависимости критического значения числа Рейля-Дарси от амплитуды и частоты пульсаций, получены карты устойчивости в пространстве параметров задачи. Исследовано влияние безразмерной ширины области на устойчивость течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-21-00090).

ЛИТЕРАТУРА

1. Maryshev B.S. *The Effect of Sorption on Linear Stability for the Solutal Horton–Rogers–Lapwood Problem*. *Transport in Porous Media*. 2015. V. 109. Pp. 747–764.
2. Maryshev B.S., Lyubimova T.P., Lyubimov D.V. *TLyubimov Stability of homogeneous seepage of a liquid mixture through a closed region of the saturated porous medium in the presence of the solute immobilization*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. V. 102. Pp. 113–121.
3. Selim H., Amacher M. *Reactivity and Transport of Heavy Metals in Soils, Environmental Science and Engineering*. Taylor & Francis, 1996.
4. Гольдштик М. А., Штерн В. Н. *Гидродинамическая устойчивость и турбулентность*. Новосибирск: Наука, 1977.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ СО СЛУЧАЙНЫМИ МАКРОСКОПИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Б. С. Марышев, Д. С. Голдобин

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Работа посвящена исследованию гидродинамической диффузии пассивных примесей, возникающей в процессе вынужденного вытеснения жидкости, насыщающей пористую среду. Реальные пористые среды характеризуются двумя масштабами пористости: микроскопический, масштаб малых каналов пор или гранул в гранулярных материалах, и макроскопический, масштаб неоднородностей пористой среды. Макроскопические неоднородности связаны как с различными геологическими процессами (вымывание, формирование разломов и т.п.), так и с камнями и иными включениями — эти неоднородности всегда присутствуют, даже в идеальном случае [1, 2], когда пористая среда сформирована идентичными сферами. При вытеснении жидкости макроскопические неоднородности приводят к пространственно нерегулярным течениям и ответственны за дисперсию частиц жидкости, которая вызывает дополнительную (к молекулярной диффузии) гидродинамическую диффузию. В отличие от молекулярной, такая диффузия анизотропна и непостоянна, пропорциональна скорости вытеснения.

В данной работе рассмотрены неоднородности как проницаемости, так и пористости, допущены самые общие варианты статистических свойств неоднородностей. Единственное ограничение — их малость — вполне обосновано для рассматриваемых систем. С помощью метода функций Грина вычислены выражения для коэффициентов конвективной диффузии в пористых средах при макроскопическом беспорядке с произвольными статистическими свойствами. Обсуждено соотношение между коэффициентами «временной» диффузии и дисперсии. Выявлена существенная топологическая разница между двух- и трехмерными ситуациями.

При изотропном беспорядке поперечная взаимная дисперсия оказывается нулевой как в двухмерной постановке задачи, где она топологически запрещена, так и в трехмерной, где топологического запрета нет.

Работа выполнена при поддержке гранта президента Российской Федерации № МК-1447.2017.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Collins R. E. *Flow of Fluids through Porous Materials*. New York: Reinhold, 1961.
2. Sahimi M. *Flow phenomena in rocks – from continuum models to fractals, percolation, cellular-automata, and simulated annealing*. International Rev. Mod. Phys. 1993. V. 65. Pp. 1393–1534.

О ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ГРУППЫ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ И ЗАКОНАХ СОХРАНЕНИЯ

А. Г. Меграбов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск

Новосибирский государственный технический университет

Ниже групповые термины понимаются в смысле книги Л. В. Овсянникова “Групповой анализ дифференциальных уравнений. М., Наука, 1978”.

Изучена 10-параметрическая группа Ли G_{10} с базисными операторами ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$) $X_i = \partial/\partial x_i$ ($i = 1, 2, 3$, операторы сдвигов), $X_{ij} = x_j \frac{\partial}{\partial x_i} - x_i \frac{\partial}{\partial x_j}$ ($j = 2, 3$, $i < j$, операторы вращений) $Z = x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} + z \frac{\partial}{\partial z} - 2u^2 \frac{\partial}{\partial u^2}$ (оператор растяжения), $Y_i = \sum_{j=1}^3 (2x^i x^j - \delta_j^i \sum_{i=1}^3 x_i^2) \frac{\partial}{\partial x_j} - 2x_i u^2 \frac{\partial}{\partial u^2}$ ($i = 1, 2, 3$, операторы, связанные с инверсиями). Группа G_{10} является расширением группы конформных преобразований евклидова пространства x, y, z на пространство x, y, z, t , $u^1 = u(x, y, z, t)$, $u^2 = n^2(x, y, z)$ и группой эквивалентности уравнения эйконала $u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = n^2(x, y, z)$, уравнения акустики $\frac{\Delta u}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{\text{grad } u \cdot \text{grad } \ln \rho}{\rho} = u_{tt}$ ($u^2 = \rho$) и других ДУ с переменным параметром u^2 , а также трехмерным аналогом группы G двумерного случая с операторами $X = \Phi(x, y) \frac{\partial}{\partial x} + \Psi(x, y) \frac{\partial}{\partial y} - 2\Phi_x(x, y) u^2 \frac{\partial}{\partial u^2}$, где Φ, Ψ — произвольные сопряженные гармонические функции. (О группе G см. в статье автора в ДАН, 1984, т. 275, № 3). Вычислены операторы инвариантного дифференцирования группы G_{10} вида $A_1 = D_t$, $A_2 = \frac{1}{u^2} (\text{grad } u \cdot \text{grad})$, $A_3 = -\frac{1}{(u^2)^2} ([\text{grad } u \times (\text{grad } u \times \text{grad } J^7)] \cdot \text{grad})$ (или $A_3 = \frac{1}{u^2} (\text{grad } J^7 \cdot \text{grad})$), $A_4 = \frac{1}{(u^2)^{3/2}} ([\text{grad } u \times \text{grad } J^7] \cdot \text{grad})$, $\text{grad} = (D_x, D_y, D_z)$, $J^7 = \Delta_1 u = |\text{grad } u|^2 / u^2$. Операторы A_2, A_3, A_4 при $u^2 \equiv 1$ пропорциональны операторам дифференцирования скалярной функции соответственно по направлению ортов Френе τ, ν, β векторной линии L_τ поля $\text{grad } u = |\text{grad } u| \tau$.

Вычислены дифференциальные инварианты группы G вплоть до 3-го порядка. Найден геометрический смысл некоторых из них:

$$J^{11} = R = 2 \left\{ \frac{\Delta \ln n^2}{n^2} + \frac{1}{4} \frac{|\text{grad } \ln n^2|^2}{n^2} \right\} = \frac{2}{n^{5/2}} \text{div} \{ n^{1/2} \text{grad } \ln n^2 \}$$

– скалярная кривизна риманова пространства с метрикой $dl^2 = n^2(x, y, z)\{dx^2 + dy^2 + dz^2\}$,

$$J^7 = \Delta_1 u$$

и

$$J^4 = \Delta_2 u = \frac{\Delta u}{n^2} + \frac{(\text{grad } u \cdot \text{grad } \ln n^2)}{n^2} = \frac{\text{div}(n \text{ grad } u)}{n^3}$$

– первый и второй дифференциальный параметр Бельтрами функции $u(x, y, z)$ для этой метрики,

$$J^{13} = \Delta_2 \ln J^7 = \frac{1}{n^3} \text{div}\{n \text{ grad } \ln J^7\},$$

$$J^{14} = \frac{1}{n^3} \text{div} \left\{ n \frac{J^4}{J^7} \text{grad } u \right\},$$

$$J^{15} = \frac{1}{n^3} \text{div} \left\{ n \left[-\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau}) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\tau} \cdot \text{grad } \ln n^2) \right] \right\} + \frac{1}{8} \frac{|\text{grad } \ln n^2|^2}{n^2},$$

где $\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau}) = \text{rot } \boldsymbol{\tau} \times \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau} \text{ div } \boldsymbol{\tau}$, $\boldsymbol{\tau} = \text{grad } u / |\text{grad } u|$ – направление векторного поля $\text{grad } u$. Установлены формула $\frac{1}{4} R = J^{14} - \frac{1}{2} J^{13} - J^{15}$ и геометрический смысл векторного поля $\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})$ как суммы трех векторов кривизны трех кривых, одна из них – кривая L_τ . Поле $\mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})$ входит в представление $K = -\frac{1}{2} \text{div } \mathbf{S}(\boldsymbol{\tau})$ Ю. А. Аминова для полной кривизны второго рода K произвольного единичного поля $\boldsymbol{\tau}$, а также в дифференциальные тождества и законы сохранения для семейств произвольных гладких кривых и поверхностей, полученные автором. С помощью этих общих геометрических формул найдены дифференциальные законы сохранения различного порядка для уравнения эйконала, гидродинамических уравнений Эйлера и др. В плоском случае найденные формулы переходят в результаты в [1-5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Меграбов А. Г. *Об одном дифференциальном тождестве*. ДАН. 2004. Т. 395. № 2. С. 174–177. 1966.
2. Меграбов А. Г. *Дифференциальные тождества, связывающие лапласиан скалярной функции, модель ее градиента и его направления*. ДАН. 2009. Т. 424. № 5. С. 599–603.
3. Меграбов А. Г. *Дифференциальные тождества, связывающие модуль и направление векторного поля, и гидродинамические уравнения Эйлера*. ДАН. 2010. Т. 433. № 3. С. 309–313.
4. Меграбов А. Г. *Некоторые дифференциальные тождества и их приложения к уравнению Эйконала*. ДАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 461–465.
5. Меграбов А. Г. *Дивергентные формулы (законы сохранения) в дифференциальной геометрии плоских кривых и их приложения*. ДАН. 2011. Т. 441. № 3. С. 313–317.

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ МАКСВЕЛЛА

С. В. Мелешко¹, Н. П. Мошкин^{2,3}, А. Г. Петрова⁴, В. В. Пухначев^{2,3}

¹*Технический университет Суранари, Након Ратчасима, Таиланд*

²*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный университет*

⁴*Алтайский государственный университет, Барнаул*

В докладе рассматриваются волновые процессы в несжимаемой вязкоупругой среде Максвелла. Они описываются системой квазилинейных уравнений составного типа. Выделяется класс решений, для которого эта система распадается на гиперболическую и эллиптическую части. В зависимости от выбора объективной производной в законе поведения, возможны слоистые движения с сильными или слабыми разрывами.

На основе эффективно одномерных моделей изучены нестационарные движения вблизи критической точки. Переход к переменным Лагранжа позволяет сформулировать начальнo-краевую задачу для симметрической гиперболической системы. Эта система относится к классу слабо нелинейных гиперболических систем, изученных Яненко. В ней в процессе движения не возникают сильные разрывы, но решения со слабыми разрывами допускаются.

В общем трехмерном случае вычислены характеристики системы уравнений 10-го порядка. Их совокупность состоит из двух комплексных характеристик, четырехкратной контактной характеристики и четырех волновых характеристик. При выборе производной Яуманна или нижней конвективной производной существуют две различные скорости распространения нелинейных волн сдвига, а в случае верхней конвективной производной в реологическом соотношении происходит их совпадение.

Время релаксации τ входит коэффициентом при старшей производной в законе поведения, что является причиной появления пульсаций в нестационарных задачах. Это хорошо иллюстрируется на примере линеаризованной задачи, в которой задачи отыскания поля скоростей, напряжений и давления разделяются. Здесь неожиданным результатом является быстрая стабилизация поля давлений при $\tau \rightarrow 0$ на фоне высокочастотных колебаний вектора скорости.

Что касается стационарной задачи, то там удастся построить асимптотическое разложение решение по малому времени релаксации τ , не содержащее функций типа пограничного слоя. Типичный пример дает задача о стационарном течении вблизи критической точки. Ее решение при стремлении времени релаксации к нулю переходит в хорошо известное решение Хименца.

Случай больших времен релаксации интересен тем, что предельная модель при $\tau \rightarrow \infty$ допускает существенно более широкую псевдогруппу Ли, чем исходная. На основе инвариантных решений предельной системы строятся приближенные решения исходной системы в виде ряда по степеням $1/\tau$.

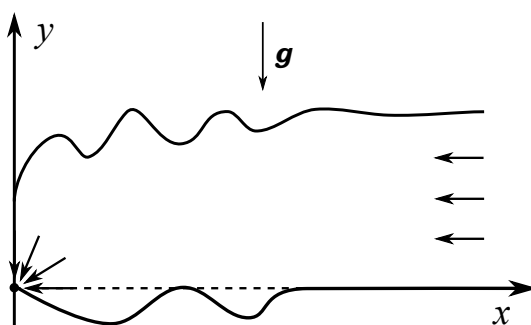
О СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕ ПОТОКА ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ С ТОЧЕЧНЫМ СТОКОМ

А. А. Местникова¹, В. Н. Старовойтов^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

Рассматривается двумерная задача о потенциальном течении идеальной несжимаемой жидкости, ограниченной свободной поверхностью сверху и криволинейным дном снизу. Нижняя граница предполагается непроницаемой всюду кроме одной точки, в которой расположен сингулярный точечный сток заданной интенсивности. Неровности дна имеют компактный носитель и симметричны относительно точки стока, поэтому симметричной относительно вертикальной оси является и картина течения (на рисунке показана его правая половина). Верхняя граница является неизвестной и должна быть определена в процессе решения задачи. Эта граница свободна от напряжений (динамическое условие) и вектор поля скорости жидкости направлен по касательной к ней (кинематическое условие). Поле скорости внутри области течения находится из условия, что его потенциал и функция тока являются сопряженными гармоническими функциями.



Предполагается, что на бесконечности течение стремится к равномерному потоку. Проведено численное и аналитическое исследование задачи.

По сравнению с работой [1] здесь мы сталкиваемся с существенной трудностью, связанной с неровностью дна. При использовании комплексной формулировки задачи мнимая часть комплексной скорости не обращается в нуль на дне, что создает сложности с аналитическим продолжением. По этой причине в данной работе пришлось развить метод, который существенно отличается от предложенного в [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Mestnikova A. A., Starovoitov V. N. *Free-surface potential flow of an ideal fluid due to a singular sink*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 722. P. 012035.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО БИОКОМПОЗИТА

В. А. Микушина¹, И. Ю. Смолин^{1,2}, Ю. Н. Сидоренко¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Керамические материалы широко применяются в медицине для производства более качественных изделий медицинской техники и разработки новых технологий. Например, в хирургической медицине используют изделия для создания “заменителей” поврежденных или разрушенных тканей человеческого тела. Керамика на основе диоксида циркония обладает прекрасной биосовместимостью с живыми тканями организма человека, а также характеризуется высокой прочностью [1]. Проблема оценки прочности и надежности изделий из керамических материалов является одной из наиболее важных в настоящее время.

Цель настоящей работы — численное исследование механического поведения биокompозита “керамика на основе ZrO_2 — кортикальная костная ткань” с использованием многоуровневого подхода. Построена двумерная геометрическая модель биокompозита, согласно которой, биокompозит представляет собой пористую керамику на основе диоксида циркония, заполненную кортикальной костной тканью. Поры керамического имплантата описываются явным образом, представлены в модели круговыми включениями и хаотично размещены в пределах моделируемого объема с полидисперсным распределением по размерам.

Численное моделирование механического поведения биокompозита с учетом накопления повреждений проводилось в рамках многоуровневого подхода. Определение параметров напряженно-деформированного состояния объема биокompозита на мезоскопическом уровне производился с помощью метода конечных элементов в двумерной постановке. Рассматривался случай статического одноосного нагружения и упруго-хрупкая модель материала. При выполнении критерия разрушения в элементарных объемах рассчитывался параметр поврежденности мезообъема для каждой компоненты композита [2].

В результате проведенного исследования определены эффективные механические характеристики керамического биокompозита. Исследована эволюция законов распределения мезоскопических напряжений в компонентах биокompозита в процессе его деформирования с учетом накопления повреждений вплоть до выполнения критерия макропрочности. Показано, что накопление повреждений влияет на параметры законов распределения характеристик напряженно-деформированного состояния биокompозита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канюков В. Н., Стрекаловская А. Д., Килькинов В. И. *Материалы для современной медицины*. Оренбург: ГОУОГУ, 2004.
2. Советова Ю. В., Сидоренко Ю. Н., Скрипняк В. А. *Многоуровневый подход к определению эффективных свойств композита с учетом повреждаемости*. Физ. мезомех. 2013. Т. 16. № 5. С. 59–65.

МАСШТАБ ОСЛАБЛЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЕ

В. Е. Миренков

Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

Масштабный эффект — хорошо известный в технике факт, заключающийся в том, что разрушающее напряжение для образцов малого размера выше, чем для больших образцов, и крупные изделия разрушаются при напряжениях значительно меньших, чем те, которые можно было бы считать допустимыми на основании лабораторных опытов над образцами из того же материала. Обоснованием этого факта служит утверждение, что большей свободной поверхности отверстия соответствует большее количество дефектов структуры, которые и служат источником начала разрушения. В основе предлагаемого объяснения лежит учет собственного веса материала для области, содержащей ослабление. В мировой практике расчета напряженно-деформированного состояния в окрестности ослаблений, собственный вес никак не учитывался, что приводит к несоответствию численного счета и натурных замеров смещений. Рассматривается феноменологическая модель деформирования, устраняющая это различие. Предлагаемая теория учитывает, что направление действия веса материала над отверстием совпадает с растягивающими напряжениями на контуре, а под отверстием эти направления различны. Изменение граничных значений напряжений сохраняет геометрию изолиний предельных значений, пропорционально изменяя напряженное состояние на них. При пропорциональном изменении характерного размера отверстия изменяются положения изолиний напряженно-деформированного состояния, но сохраняются значения на них, т.е. область возможного обрушения также изменяется. Для большего размера отверстия вес материала в области возможного обрушения больше и добавка от учета веса, например к вычисленным максимальным касательным напряжениям, больше и быстрее приводит к разрушению.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ КУСОЧНО-ОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Е. Миренков, А. В. Савченко

Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

Граничные задачи являются многопараметрическими, и зависимость искомого решения от них может быть сложной. Влияние одних параметров на решение может быть очень заметным, в то время как других — менее заметным. Характер зависимости решения от параметров становится известным после обращения граничной задачи. Обращение граничной задачи и исследование поведения решения в зависимости от значений параметров, задаваемых как правило априори, достигается численными методами и при этом встает много вопросов: относительно точности решения, описания влияния параметров на решение для разных их значений при одновременном их изменении. В настоящее время известны решения частных обратных задач в зависимости от одного параметра. Для всех таких задач есть общее требование — необходимость преодоления некорректности через регуляризацию или через получение точных уравнений. Предложена система сингулярных интегральных уравнений, позволяющая выписать аналитическое решение для компонент смещений на границе

рассматриваемой области в квадратурах и аналогично для компонент напряжений, что дает возможность исключить процесс регуляризации и предложить метод сведения проблемы к процедуре последовательных приближений, сходящихся к точному решению для упругих характеристик, граничных условий, а также геометрии ослаблений, при их наличии, последовательными приближениями. Алгоритм реализации представляет переборный процесс, с помощью которого восстанавливаются функции, наилучшим образом удовлетворяющие заданным условиям, что приводит, в связи с этим, к выполнению большого объема вычислений. При определении всех параметров задачи, согласованных с натуральными замерами смещений, процесс расчета деформирования сводится в класс трудно решаемых проблем.

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА С ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ ПОРИСТЫМИ ВСТАВКАМИ

С. Г. Мионов, Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет*

В последние годы возникла идея управления аэродинамическими силами с помощью газопроницаемых пористых вставок в планер сверхзвукового летательного аппарата [1, 2]. В данной работе представлены результаты экспериментально-расчетного исследования влияния нагревания газопроницаемых пористых вставок из ячеистого никеля (пористость 95 %, диаметр пор 1 мм) на аэродинамическое сопротивление цилиндрических тел в сверхзвуковом потоке.

Эксперименты были выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327Б ИТПМ СО РАН при числе Маха потока $M_\infty = 4,85$ и 7 и соответствующих единичных числах Рейнольдса $Re_{1\infty} = 3,3 \cdot 10^6$ и $1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. В экспериментах при $M_\infty = 4,85$ использована цилиндрическая модель [1], на которой изучалось влияние термического лучистого нагрева пористого материала передней вставки на гидравлическое сопротивление течению воздуха в порах. Эксперименты сопровождалось численным моделированием в рамках дискретной модели пористой среды [3]. Показан рост аэродинамического сопротивления модели до 12 % при нагреве вставки на 400 градусов. В экспериментах при $M_\infty = 7$ изучалось управление аэродинамическим сопротивлением путем теплового регулирования переброски части набегающего потока в донную область модели через пористые вставки [2]. Здесь модель представляла собой тонкостенный фторопластовый цилиндр продольный потоку с двумя дисками из ячеисто-пористого никеля, вставленными в цилиндр на расстоянии друг от друга. В сверхзвуковом потоке между дисками зажигался тлеющий электрический разряд для нагрева пористых дисков, которые, в свою очередь, за счет роста вязкости снижали перепускаемый в донную область поток воздуха. Показан рост аэродинамического сопротивления модели до 5 - 7 % при нагреве вставок на 300 градусов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-03867).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. *Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке пористыми материалами*. Письма ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 3. С. 39–45.
2. Фомин В.М., Запрягаев В.И., Локотко А.В. и др. *Аэродинамика тел вращения с газопроницаемыми участками поверхности*. ПМТФ. 2010. Т. 51, № 1. С 79–88.
3. Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V., Mironov S.G. *Supersonic flow around a cylinder with front gas-permeable insert which modeled by skeleton of porous material*. AIP Conf. Proc. 2016. V. 1770, No. 030067.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ В СВЯЗАННОЙ ПОСТАНОВКЕ (ПОЛЗУЧЕСТЬ – ПОВРЕЖДЕННОСТЬ)

Е. А. Миронова, Л. В. Степанова

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

Одним из актуальных вопросов современной нелинейной механики разрушения является анализ напряженно – деформированного состояния у вершины трещины в материалах с нелинейными конституциональными уравнениями при смешанном деформировании [1-3] в полном диапазоне смешанных форм нагружения образца с трещиной с учетом процессов накопления повреждений. Поэтому построение теоретических и численных решений задачи определения полей напряжений, деформаций (скоростей деформаций), перемещений и сплошности у вершины трещины представляет собой актуальную проблему. В настоящей работе рассматривается класс краевых задач определения полей напряжений, скоростей деформаций, перемещений и сплошности в окрестности вершины трещины при смешанном нагружении в связанной постановке задачи, когда параметр сплошности (поврежденности) входит в определяющие уравнения материала. В работе выполнена попытка инкорпорирования параметра сплошности в расчетную схему метода конечного элемента в программном комплексе Simulia Abaqus (Student Edition). При построении конечно-элементного решения была применена пользовательская процедура UMAT. В результате расчета построены распределения поля сплошности у вершины трещины 1) нормального отрыва; 2) в условиях смешанного нагружения в полном диапазоне смешанных форм деформирования от чистого нормального отрыва до чистого поперечного сдвига. Показано, что у вершины трещины формируется область активного накопления повреждений. Проведены сравнения геометрии зоны процесса, полученной с помощью аналитического решения, основанного на автомодельном представлении решения, и численного решения задачи, базирующегося на методе конечного элемента. Зоны активного накопления повреждений близки по своей форме и размерам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00571).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stepanova L. V., Yakovleva E. M. *Asymptotic stress field in the vicinity of a mixed-mode crack under plane stress conditions for a power-law hardening material*. Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2015. V. 10. № 3. Pp. 367–393.
2. Stepanova L. V., Igonin S. A. *Asymptotics of the near-crack-tip stress field of a growing fatigue crack in damage materials: Numerical experiment and analytical solution*. Numerical Analysis and Applications. 2015. V. 8. № 2. Pp. 168–181.
3. Stepanova L., Adylina E. S. *Tress-strain state in the vicinity of a crack tip under mixed loading*. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2014. V. 55. Issue 5. Pp. 885–895.

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ УГЛЕ-МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ
СМЕСИ В РЕКУПЕРАТИВНОЙ ГОРЕЛКЕ

К. М. Моисеева¹, Д. А. Крайнов², А. А. Дементьев³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

³ЗАО НПЦ “Полюс”, Томск

Разработана физико-математическая модель горения взвеси угольной пыли в метановоздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла, описанной в [1]. В [1] было показано, что за счет рекуперации тепла возможно инициировать и поддерживать горение метановоздушной смеси с объемным содержанием метана не ниже 2 процентов по объему. Целью настоящей работы являлось определение влияния взвеси угольных частиц (инертных и реагирующих) на устойчивость горения угле-метано-воздушной смеси с малым объемным содержанием метана.

В работе выполнено исследование горения метановоздушной смеси с частицами угольной пыли. Математическая постановка задачи состоит из уравнений энергии для газа, угольных частиц и внутренней перегородки; уравнений баланса массы метана, кислорода и угольных частиц; уравнений состояния и неразрывности газа, счетной концентрации и изменения радиуса частиц. Предполагалось, что скорость движения газа и частиц равны, трением на стенках горелки пренебрегали. Коэффициенты диффузии и теплопроводности считались зависящими от температуры, теплообмен между газом и стенками горелки задавался аналогично [1]. Масса частиц задавалась такой, чтобы адиабатическая температура горения газовзвеси угольных частиц в метановоздушной смеси не превышала 2500 К.

Решение задачи выполнено численно для монодисперсной и бидисперсной взвеси угольной пыли. В расчетах варьировалась величина объемного содержания метана в смеси, размер частиц угольной пыли, а так же скорость подачи газа на входе в горелку. Из решения определены границы области устойчивого горения бедной метановоздушной смеси со взвесью угольной пыли. Область устойчивого горения определялась в зависимости от скорости подачи смеси на входе в горелку. Границей области устойчивого горения считалось предельное значение скорости подачи, для которого в горелке устанавливался устойчивый режим горения. Определено, что устойчивое горение возможно для угле-метано-воздушных смесей с содержанием метана до 1 процента по объему и массовой концентрацией угольной пыли менее 0.068 кг/м³.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-38-00188 мол-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Krainov A. Yu., Moiseeva K. M. *Combustion of Lean Methane–Air Mixtures in a Slot Burner with Adiabatic Outer Walls*. Combust. Explos. Shock Waves. 2016. V. 52. No. 1. Pp. 45–52.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В. М. Мочалова^{1,2}, А. В. Уткин¹

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

²ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ" НИЦ "Курчатовский институт", Москва

С использованием лазерного интерферометра VISAR было проведено экспериментальное исследование гетерогенного анизотропного материала стеклопластика. Стеклопластики являются композиционными материалами, которые представляют собой переплетенные стеклянные волокна, скрепленные эпоксидной смолой. Целью данной работы является исследование ударной сжимаемости стеклопластиков при различной ориентации волокон относительно направления распространения ударных волн.

Регистрация волновых профилей осуществлялась лазерным интерферометром VISAR. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги толщиной 7-400 мкм, расположенной между торцом заряда и водяным окном. Экспериментальные данные представляют собой скорость движения поверхности фольги, граничащей с водой, и передают все детали структуры импульса сжатия. В каждом опыте измерялась также скорость ударной волны. Давление ударного сжатия варьировалось изменением толщины и скорости алюминиевых ударников.

Из полученных экспериментальных данных была построена ударная адиабата стеклопластика для двух ориентаций волокон. В пределах погрешности ударные адиабаты для обоих направлений совпадают ($D=1.85+1.1*u$, км/с). На профилях массовой скорости при движении волны вдоль и поперек волокон была зарегистрирована двухволновая конфигурация во всем диапазоне давлений. Однако амплитуда предвестника вдоль волокон на порядок выше, чем для поперечного направления.

Также было проведено исследование откольной прочности стеклопластика. Величина откольной прочности данного материала при распространении волны вдоль волокон, равная примерно 82 МПа, почти на порядок выше значения откольной прочности в поперечном направлении.

Таким образом, из полученных в данной работе результатов можно сделать вывод, что корректное описание динамического деформирования анизотропных материалов, таких как стеклопластик, возможно только в рамках двухкомпонентной модели, рассматривающей реальное движение волокон и их взаимодействие с матрицей.

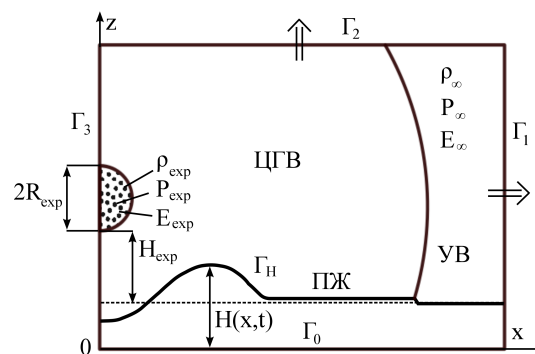
Работа выполнена при поддержке Исследовательского центра ФАИР-Россия.

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКОЙ ВОДЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗЕ

Л. В. Надкритичный

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

В работе рассматривается задача образования и распространения поверхностных волн на мелкой воде под действием ударной газовой волны (УВ), образованной вследствие распада цилиндрической области повышенного давления в газе на некотором удалении от слоя жидкости. Такие ударные волны могут возникать, например, при детонации газовых смесей [1, 2]. Используя для описания динамики газа уравнения совершенного идеального газа, а для динамики жидкости – уравнения мелкой воды с учетом поля внешнего давления и проводя сопряжение параметров обеих моделей на границе раздела сред, моделируется задача цилиндрического газового взрыва (ЦГВ). ЦГВ является следствием распада цилиндрической области повышенного давления газа (ρ_{exp} – плотность, P_{exp} – давление, E_{exp} – внутренняя энергия, R_{exp} – радиус области повышенного давления), расположенного на расстоянии H_{exp} от поверхности мелкой воды. В результате распада этой области образуется УВ, которая воздействует на поверхность жидкости (ПЖ), создавая тем самым на ней поверхностное возмущение $H(x, t)$.



Численные расчеты проводятся на подвижной разностной сетке, геометрическое расположение узлов и граней которой изменяются согласно деформации границы раздела сред (ПЖ) [3]. Такой подход достаточно трудоемок как для вычислений, так и для численной реализации, но позволяет получить достоверные результаты.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (код проекта 0262-2015-0066), Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-01-00625) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН по стратегическим направлениям развития науки “Фундаментальные проблемы математического моделирования” (код проекта 0262-2014-0157).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. *Газовые взрывы*. СПб.: Астерион, 2007.
2. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. *Фугасное действие взрывов*. СПб.: Астерион, 2007.
3. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. М.: Наука, 1976.

АСИМПТОТИКА ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О НАБЕГЕ ДЛИННЫХ ВОЛН НА ПОЛОГИЙ БЕРЕГ

В. Е. Назайкинский

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва
Московский физико-технический институт

Для двумерного волнового уравнения с переменной скоростью рассматривается задача Коши с локализованными начальными условиями. Предполагается, что скорость вырождается на границе области как корень квадратный из расстояния до берега. В частности, такая задача описывает в линейном приближении набег волн цунами на пологий берег (см. [1]), причем в ней имеется естественный малый параметр — отношение характерных размеров источника и бассейна, что позволяет изучать ее асимптотическими методами. В работах [2, 3] был развит метод построения асимптотических решений, основанный на модифицированном каноническом операторе Маслова и неограниченных по импульсным переменным характеристиках (траекториях), нестандартных с точки зрения теории уравнений с частными производными. В окрестности линии вырождения скорости, являющейся каустикой специального вида, канонический оператор определяется с помощью преобразования Ханкеля, которое возникает при применении процедуры квантования Фока к каноническому преобразованию, регуляризирующему указанные нестандартные характеристики. В докладе будет показано, что асимптотика сужения решения на границу области определяется обычным каноническим оператором, что сильно упрощает асимптотические формулы для решения на границе, причем для случая специальных начальных возмущений решения выражаются через простые алгебраические функции. Последнее позволяет, по крайней мере на физическом уровне строгости, получить с помощью преобразования Кэрриера–Гринспена формулы, связывающие величину заплеска волны с параметрами порождающего ее источника. Доклад основан на совместных с С. Ю. Доброхотовым и А. А. Толченниковым работах [4, 5]. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-11-10282).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пелиновский Е. Н. *Гидродинамика волн цунами*. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996.
2. Dobrokhotov S. Yu., Nazaikinskii V. E., Tirozzi B. *Two-dimensional wave equation with degeneration on the curvilinear boundary of the domain and asymptotic solutions with localized initial data*. Russ. J. Math. Phys. 2013. Т. 20. № 4. С. 389–401.
3. Назайкинский В. Е. *Канонический оператор Маслова на лагранжевых многообразиях в фазовом пространстве, соответствующем вырождающемуся на границе волновому уравнению*. Матем. заметки. 2014. Т. 96. № 2. С. 261–276.
4. Доброхотов С. Ю., Назайкинский В. Е. *Характеристики с особенностями и граничные значения асимптотического решения задачи Коши для вырождающегося волнового уравнения*. Матем. заметки. 2016. Т. 100. № 5. С. 710–731.
5. Доброхотов С. Ю., Назайкинский В. Е., Толченников А. А. *Равномерная асимптотика граничных значений решения линейной задачи о набеге волн на пологий берег*. Матем. заметки. 2017. Т. 101. № 5. С. 700–715.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ СОРБИРУЮЩИХ СРЕД: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Л. А. Назарова¹, Л. А. Назаров¹, М. Вандамм², Ж.-М. Перейра²

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

²Universite Paris-Est, Paris

Оптимизация схем дегазации при подготовке к выемке участков залежи, оценка сорбционной способности угля при закачке в пласты газообразных промышленных отходов для улучшения экологической обстановки — вот далеко не полный перечень проблем, при решении которых необходимо знать деформационные и фильтрационно-емкостные характеристики углей.

Определение газокинетических параметров угля по данным “canister test”. Эксперимент заключается в регистрации давления газа $P(t)$ в герметичной колбе с помещенной в нее пробой угольного шлама. В рамках разработанной нелинейной модели, учитывающей диффузию и десорбцию метана, а также гранулометрический состав пробы, показана однозначная разрешимость обратной задачи определения газосодержания C , коэффициентов диффузии D , массообмена β и кинетики десорбции γ по $P(t)$, полученному в режиме измерения “pressure drop”. Процедура решения предусматривает введение основной $\Phi(C, D, \beta, \gamma)$ и дополнительной $\Psi(D, \beta, \gamma)$ целевых функций. Методом сопряженных градиентов сначала ищется точка минимума (D_m, β_m, γ_m) функции Ψ , затем — функции $\Phi(C, D_m, \beta_m, \gamma_m)$. Апробация методики осуществлена на реальных данных измерений давления в пяти емкостях с пробами углей шахты “Алардинская” (Кузбасс).

Оценка упругих характеристик и проницаемости угольного вещества по результатам адсорбционных испытаний. Помещенный в герметичную емкость предварительно дегазированный цилиндрический угольный образец сжимался в осевом r и радиальном z направлениях постоянными напряжениями. Затем в емкости создавалось постоянное давление газа (CO_2) и измерялись деформации $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_z(t)$. С использованием уравнений состояний ортотропной пороупругой среды разработана 2D геомеханическая модель такого эксперимента и численно-аналитический метод ее реализации, основанный на осреднении по пространственным координатам. Показано, что ε_r и ε_z пропорциональны средним по объему адсорбционным напряжениям. С использованием данных лабораторных испытаний [1] решена коэффициентная обратная задача определения упругих модулей и проницаемости матрицы по $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_z(t)$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-55-15046) в рамках соглашения РФФИ–CNRF (PICS06582).

ЛИТЕРАТУРА

1. Espinoza D.N., Vandamme M., Pereira J.-M. et al. *Measurement and modeling of adsorptive-poro-mechanical properties of bituminous coal cores exposed to CO_2 : Adsorption, swelling strains, swelling stresses and impact on fracture permeability.* Int. J. of Coal Geology. 2014. V. 134–135. Pp. 80–95.

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА С ПЯТЬЮ ИСТОЧНИКАМИ НАГРЕВА

А. Г. Обухов¹, Д. Д. Баранникова²

¹Тюменский индустриальный университет

²Тюменский государственный университет

Наряду с торнадо и тропическими циклонами в природе наблюдаются [1] и так называемые огненные вихри, закрутка которых имеет другое направление: отрицательное в Северном полушарии и положительное в Южном полушарии. В работе [2] строго математически описано решение системы уравнений газовой динамики, определяющее возникновение закрутки в соответствующем направлении радиально движущегося газа от нагревающейся поверхности вертикального цилиндра.

В экспериментах [3] удалось создать течения, близкие к наблюдаемым в природе огненным вихрям, причем без использования принудительной закрутки.

Целью данной работы является численное моделирование и детальный анализ термодинамических характеристик возникающих сложных течений вязкого сжимаемого теплопроводного газа на начальной стадии формирования восходящего закрученного потока, вызванного локальным прогревом подстилающей поверхности пятью источниками нагрева.

Для описания сложных трехмерных нестационарных течений сжимаемого политропного газа, обладающего диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, используется полная система уравнений Навье-Стокса с учетом действия сил тяжести и Кориолиса [4] в предположении постоянства коэффициентов вязкости и теплопроводности.

Используя начальные [5] и граничные [6] условия с помощью явной разностной схемы были рассчитаны термодинамические характеристики сложных нестационарных трехмерных течений сжимаемого теплопроводного газа в расчетной области в виде куба при локальном нагреве пятью источниками его нижней грани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наливкин Д. В. *Смерчи*. М.: Наука, 1984.
2. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. *Закрутка огненного вихря при учете сил тяжести и Кориолиса*. ТВТ. 2015. Т. 53. № 6. С. 961–964.
3. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. *О возможной генерации огненных вихрей без использования принудительной закрутки*. ДАН. 2014. Т. 456. № 2. С. 159–161.
4. Баутин С. П. *Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике*. Новосибирск: Наука, 2009.
5. Баутин С. П., Обухов А. Г. *Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики*. Известия вузов. Нефть и газ. 2013. № 4. С. 81–86.
6. Баутин С. П., Обухов А. Г. *Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа*. Известия вузов. Нефть и газ. 2013. № 5. С. 55–63.

РАСЧЕТ СКОРОСТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПРОДУВЕ

А. Г. Обухов¹, Р. Е. Волков²

¹Тюменский индустриальный университет

²Тюменский государственный университет

В модели сжимаемой сплошной среды для полной системы уравнений Навье-Стокса предложена начально-краевая задача, соответствующая проведенным и планируемым экспериментам и описывающая сложные трехмерные течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в восходящих закрученных потоках, которые инициируются вертикальным холодным продувом.

С помощью явных разностных схем и предложенных начально-краевых условий построены приближенные решения полной системы уравнений Навье-Стокса и определены скоростные и энергетические характеристики трехмерных нестационарных течений газа в восходящих закрученных потоках [1].

Численными методами с использованием методов распараллеливания построены трехмерные нестационарные течения политропного вязкого сжимаемого теплопроводного газа в разномасштабных восходящих закрученных потоках при условии действия сил тяжести и Кориолиса [2].

Предложенная модель газа как движущейся сжимаемой сплошной среды, обладающей диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, при численном моделировании возникающих при холодном вертикальном продуве сложных закрученных течений дает основные газодинамические характеристики, совпадающие с данными натуральных экспериментов [3].

Сопоставление рассчитанных численных значений кинетических энергий позволяет сделать вывод о том, что основной вклад порядка 97% в общую кинетическую энергию восходящего закрученного потока дает кинетическая энергия вращательного движения. Именно эта часть энергии была получена восходящим закрученным потоком от энергии вращения Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. *Численный расчет скоростных характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа*. Известия вузов. Нефть и газ. 2014. № 3. С. 88–94.
2. Волков Р. Е., Обухов А. Г. *Параллельные вычисления в исследованиях зависимости газодинамических параметров восходящего закрученного потока газа от скорости продува*. Известия вузов. Нефть и газ. 2016. № 1. С. 92–97.
3. Волков Р. Е., Обухов А. Г. *Метод распараллеливания алгоритма численного решения полной системы уравнений Навье-Стокса*. Известия вузов. Нефть и газ. 2016. № 2. С. 92–98.

АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ СЛЕДОВ ЗА ТАНДЕМАМИ ИЗ НЕПОДВИЖНЫХ ДИСКОВ И ВРАЩАЮЩИХСЯ РОТОРОВ

В. Л. Окулов^{1,2}, И. В. Литвинов¹, Р. Ф. Миккельсен², И. В. Наумов¹

¹Институт теплофизики им С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Ветроэнергетический факультет, ДТУ, Лунгбю, Дания

Прогнозирование вырабатываемой мощности и устойчивой работы ветровых турбин, расположенных друг за другом ветроэлектростанции, остается до сих пор открытым вопросом, несмотря на обширные исследования данной темы в последнее десятилетие [1]. В частности, еще не найдено объяснение возникновения стабилизации производимой мощности, вместо ожидаемого ее затухания, в последующих турбинах при их работе в цепочке друг за другом. Хотя этот эффект известен и используется при эксплуатации ветроэлектростанций, но для полного выяснения возможных причин интересного феномена, необходимо провести еще дополнительные исследования о развитии и взаимодействии следов с различными телами, помещаемыми в них вниз по потоку.

Настоящая работа обобщает предыдущие экспериментальные исследования авторов по изучению развития следов за разными одиночными и парными конфигурациями из неподвижных дисков или вращающихся роторов [2-5]. Целью исследования является получение достоверного описания для законов формирования и распространения следов, предсказания их влияния на взаимодействующие с ними ветровые турбины в крупных ветроэлектростанциях. Сопоставление параметров течения в ближнем и дальнем следе за одиночными (диск или ротор) [2-3] и двойными (диск-диск, диск-ротор или ротор-ротор) [4-5] системами было проведено для одинаковых условий обтекания и режимов работы роторов. Был установлен неожиданный факт: для тандема из двух дисков дефицит скорости в общем следе ожидаемо увеличивается по сравнению с одиночным диском, а для тандема из двух роторов, наоборот, неожиданно падает по сравнению со следом за одиночным ротором. Различия могут быть объяснены влиянием концевых вихрей, сходящих с лопастей вращающихся роторов, но которые отсутствуют при обтекании дисков. Дополнительное исследование структуры ближнего следа для всех конфигураций было проведено в целях подтверждения этой гипотезы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nygaard N. G. *Wakes in very large wind farms and the effect of neighbouring wind farms*. Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 524. 012162.
2. Naumov I. V., Mikkelsen R. F., Okulov V. L., Sørensen J. N. *PIV and LDA measurements of the wake behind a wind turbine model*. Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 524(1). 012168
3. Okulov V. L., Naumov I. V., Mikkelsen R. F., Sørensen J. N. *Wake effect on a uniform flow behind wind-turbine model*. Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 625. 012011.
4. Okulov V. L., Mikkelsen R. F., Naumov I. V., Litvinov I. V., Gesheva E., Sørensen J. N. *Comparison of the far wake behind dual rotor and dual disk configurations*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 753. 032060.
5. Naumov I. V., Kabardin I. K., Mikkelsen R. F., Okulov V. L., Sørensen J. N. *Rotor performance and wake conditions in non-uniform flow behind an obstacle*. Journal of Physics: Conference Series 2016. V. 753. 032051.

НОРМИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

С. А. Орлов¹, К. А. Матвеев²

¹Информационные спутниковые системы им. М. Ф. Решетнева, Железногорск

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

В настоящее время отечественные, как и зарубежные, космические аппараты (КА) стали выполняться по негерметичной схеме. Силовой основой таких КА являются сотовые панели и конструкции из композиционных материалов. В результате чего меняются жесткостные и демпфирующие свойства конструкций КА, способы крепления бортовой аппаратуры (БА), и как следствие, нагрузки на сами КА и входящую в их состав аппаратуру. В тоже время существующая нормативная документация, регламентирующая нагрузки на БА, и методики их отработки остаются неизменными уже более 40 лет [1]. Одним из наиболее сложных видов механических нагрузок КА и БА являются ударные воздействия повышенной интенсивности. Источником таких нагрузок являются ударные воздействия со стороны ракеты-носителя (разделение ступеней, сброс обтекателя, и т.д.), а также ударные воздействия от собственных пиросредств (отделение КА, раскрытие солнечных батарей, антенн и т.д.) [2, 3]. В докладе приводятся результаты измерений и обработки данных по испытаниям КА как от собственных пиросредств, так и пиросредств со стороны РН (в качестве источника ударных воздействий, имитирующего РН, использовалось специальное пиротехническое устройство [4]). По результатам измерений сформированы режимы автономных испытаний БА, дано обоснование применяемых коэффициентов безопасности и допустимой погрешности испытаний. Кроме того, выполнено сравнение данных представленных в [2, 5, 6] с результатами измерений, дано обоснование совпадений и отличий результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов С. А., Копытов В. И. *Нормирование и отработка бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические воздействия*. Вестник СибГАУ. Вып. №1(47): Издательство СибГАУ, Красноярск, 2013. С. 125–129.
2. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999.
3. Calvi A. *Spacecraft Loads Analysis. An Overview*. ESA / ESTEC, November 21, 2011.
4. Орлов С. А., Копытов В. И., Матвеев К. А. *Формирование ударных воздействий высокой интенсивности для пространственных конструкций*. Изв. Высш. учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 7/3 ТГУ. С. 197–200.
5. ECSS-E-HB-32-26A. Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook. 19 February 2013.
6. ECSS-E-HB-32-25A. Space engineering. Mechanical shock design and verification handbook. 14 July 2015.

МОДЕЛИ МЕХАНИКИ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

А. А. Осищов

Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва

Технология гидравлического разрыва нефтегазоносного пласта основана на закачке жидкости с твердыми частицами под большим давлением через скважину для создания трещин в пористой среде. После остановки закачки, трещины, заполненные плотно упакованным гранулированным материалом, создают каналы высокой проницаемости для транспортировки углеводородов из глубин пласта к скважине и на поверхность. В приложении к развитию технологии гидроразрыва рассматриваются четыре класса многофазных течений, описываемых в рамках многоконтинуального подхода [1]. Данные классы течений соответствуют различным стадиям технологии: (i) течение суспензии в узкой вертикальной трещине гидроразрыва на масштабе ширины/высоты трещины при небольших числах Re во время закачки [2], (ii) миграция частиц поперек трещины гидроразрыва на масштабе ширины трещины [3], (iii) фильтрация суспензии через плотную упаковку частиц в закрытой трещине гидроразрыва при очистке [4], и (iv) многофазное газо-жидкостное течение в круглой трубе (скважине) при старте, гидродинамическом исследовании скважин (ГДИС), и выводе скважины на стационарный режим добычи в широком диапазоне чисел Re [5]. Все эти задачи объединяет общее технологическое приложение и единство метода исследования, а именно – многоконтинуальный подход к моделированию многофазных течений. Обсуждаются преимущества и недостатки многоконтинуальной модели по сравнению с полуэмпирическими упрощенными моделями, такими как модель эффективной жидкости для транспорта суспензий в трещинах и модель дрейфа для газо-жидкостных течений в скважинах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин Р. И. *Динамика многофазных сред*. М.: Наука, 1987.
2. Boronin S. A., Osipov A. A. *Two-continua model of suspension flow in a hydraulic fracture*. Doklady Physics. 2010. V. 55(4). Pp. 199–202.
3. Asmolov E. S., Osipov A. A. *Asymptotic Model of the Inertial Migration of Particles in a Dilute Suspension Flow Through the Entry Region of a Channel*. Phys. Fluids. 2008. V. 20. № 1-2. 123301.
4. Boronin S. A., Osipov A. A., Tolmacheva K. I. *Multi-fluid model of suspension filtration in a porous medium*. Fluid Dynamics. 2015. V. 50(6). Pp. 759–768.
5. Krasnopolsky B., Starostin A., Osipov A. A. *Unified graph-based multi-fluid model for gas-liquid pipeline flows*. Computers & Mathematics with Applications. 2016. V. 72(5). Pp. 1244–1262.

О ПРИМЕНИМОСТИ ДЛИННОВОЛНОВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

В. В. Остапенко

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

Длинноволновое приближение $H/L \ll 1$, где H — характерная глубина потока, а L — характерная длина поверхностных волн [1], широко применяется при моделировании различных гидродинамических течений, например, течений воды в открытых руслах или в прибрежных зонах морей, пленочных течений, крупномасштабных газодинамических течений в атмосферах планет. Однако математические модели, получаемые на основе этого приближения во многих случаях представляют собой гиперболические системы законов сохранения, допускающие разрывные решения с ударными волнами, на фронтах которых пространственная производная уровня свободной поверхности жидкости $h_x = \infty$, что противоречит условию длинноволнового приближения [2], в силу которого $|h_x| \ll 1$. Не смотря на это, уравнения теории мелкой воды используются не только для описания медленно меняющихся течений с гладкой свободной поверхностью (таких как паводковые течения в реках), но также широко и успешно применяются для моделирования быстро протекающих волновых процессов, которые связаны с распространением гидравлических боров, возникающих при разрушении плотин гидросооружений или при выходе крупных морских волн типа цунами на мелководье и наклонный берег.

Для объяснения этого парадокса в работе [3] базисные законы сохранения теории мелкой воды выводятся из многомерных интегральных законов сохранения массы и полного импульса, описывающих плоскопараллельное течение идеальной несжимаемой жидкости над горизонтальным дном. Возникающие при этом ограничения на параметры течения имеют интегральную форму и непосредственно не связаны с классическим условием длинноволнового приближения $H/L \ll 1$. В настоящей работе вводится гидростатическое приближение $w^2/c^2 \ll 1$, где w — вертикальная скорость жидкости, а $c = \sqrt{gh}$ — скорость распространения малых возмущений в фиксированной точке рассматриваемого течения. Понятие гидростатического приближения обобщает понятие длинноволнового приближения и применяется для обоснования применимости теории мелкой воды при моделировании волновых течений жидкости с гидравлическими борами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedrichs K. O. *On the derivation of shallow water theory*. Comm. Pure Appl. Math. 1948. V. 1. Pp. 109–134.
2. Стокер Дж. Дж. *Волны на воде. Математическая теория и приложения*. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
3. Остапенко В. В. *О законах сохранения теории мелкой воды*. ДАН. 2015. Т. 464. № 5. С. 558–561.

О РАСЧЕТЕ РАЗРЫВНЫХ РЕШЕНИЙ СКАЛЯРНОГО ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ С НЕВЫПУКЛЫМ ПОТОКОМ

В. В. Остапенко^{1,2}, А. А. Черевко^{1,2}, Т. С. Гологуш²

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

²Новосибирский государственный университет

Линейные монотонные схемы, аппроксимирующие линейное уравнение переноса, могут иметь лишь первый порядок точности [1]. При этом нелинейные монотонные схемы первого порядка с гладкими функциями численных потоков удовлетворяют разностному аналогу энтропийного неравенства аппроксимируемого скалярного закона сохранения [2], в силу чего их предельные разрывные решения содержат только устойчивые ударные волны. Однако немонотонные разностные схемы повышенной точности, например, схема Лакса-Вендроффа [3] или стандартная схема КАБАРЕ [4] допускают предельные решения с неустойчивыми сильными разрывами [2, 5]. В случае аппроксимации с повышенным порядком скалярного закона сохранения с выпуклым потоком или гиперболической системы законов сохранения с выпуклым расширением проблема отбора устойчивых ударных волн решается путем построения схем типа TVD [6], удовлетворяющих разностному аналогу энтропийного неравенства. Однако при отсутствии такого выпуклого расширения теория построения соответствующих разностных схем повышенной точности еще находится в стадии разработки.

В настоящей работе предлагается модификация стандартной схемы КАБАРЕ, обеспечивающая ее монотонность при аппроксимации скалярного закона сохранения с невыпуклым потоком. Тестовые расчеты задачи Коши для уравнения Баклея-Левверетта с кусочно-постоянными начальными данными показали, что эта новая схема обеспечивает полный распад неустойчивых сильных разрывов, хорошо воспроизводит сопряжение ударных волн с центрированными волнами разрежения, возникающими в результате этого распада, и сохраняет повышенную точность при локализации сильных и слабых разрывов точного решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С. К. *Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики*. Матем. сборник. 1959. Т. 47. № 3. С. 271–306.
2. Harten A., Hyman J. M., Lax P. D. *On finite-difference approximation and entropy condition for shock*. Comm. Pure. Appl. Math. 1976. V. 29. Pp. 297–322.
3. Lax P. D., Wendroff B. *Systems of conservation laws*. Comm. Pure. Appl. Math. 1960. V. 13. Pp. 217–237.
4. Головизнин В. М., Зайцев М. А., Карабасов С. А., Короткин И. А. *Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов*. М.: Изд. МГУ, 2013.
5. Зюзина Н. А., Остапенко В. В. *О монотонности схемы КАБАРЕ, аппроксимирующей скалярный закон сохранения с выпуклым потоком*. ДАН. 2016. Т. 466. № 5. С. 513–517.
6. Harten A. *High resolution schemes for hyperbolic conservation laws*. J. Comp. Phys. 1983. V. 49. Pp. 357–393.

ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ СТАТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ЛАМЕ ЛИНЕЙНОЙ УПРУГОСТИ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ МАТРИЦЕЙ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ

Н. И. Остросаблин

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

Исследована двумерная система уравнений линейной теории упругости, в случае когда симметричные тензоры напряжений и деформаций связаны несимметричной матрицей модулей упругости или коэффициентов податливости. Система имеет вид

$$[(\lambda + 2\mu)\partial_{11} + \mu\partial_{22}]u_1 + [(\lambda + \mu)\partial_{12} + \beta(\partial_{11} + \partial_{22})]u_2 = 0, \quad (1)$$

$$[(\lambda + \mu)\partial_{12} - \beta(\partial_{11} + \partial_{22})]u_1 + [\mu\partial_{11} + (\lambda + 2\mu)\partial_{22}]u_2 = 0,$$

где λ , μ , β — модули упругости; ∂_k — производные по координатам x_1 , x_2 ; u_i — компоненты вектора смещения.

Линейная связь напряжений и деформаций записана в инвариантной форме, содержащей в двумерном случае три положительных собственных модуля. Аналогично [1, 2] получено представление общего решения уравнений (1) в виде линейной комбинации первых производных от двух функций, удовлетворяющих двум независимым гармоническим уравнениям:

$$u_1 = (\alpha_{111}\partial_1 + \alpha_{121}\partial_2)\varphi_1 + (\alpha_{112}\partial_1 + \alpha_{122}\partial_2)\varphi_2,$$

$$u_2 = (-\alpha_{121}\partial_1 + \alpha_{111}\partial_2)\varphi_1 + (-\alpha_{122}\partial_1 + \alpha_{112}\partial_2)\varphi_2;$$

$$k_1(\partial_{11} + \partial_{22})\varphi_1 = f_1, \quad k_2(\partial_{11} + \partial_{22})\varphi_2 = f_2;$$

$$(\beta_{111}\partial_1 + \beta_{121}\partial_2)f_1 + (\beta_{112}\partial_1 + \beta_{122}\partial_2)f_2 = 0,$$

$$(-\beta_{121}\partial_1 + \beta_{111}\partial_2)f_1 + (-\beta_{122}\partial_1 + \beta_{112}\partial_2)f_2 = 0,$$

где k_1 , k_2 , α_{ijk} , β_{ijk} — некоторые коэффициенты.

Из найденного представления непосредственно следует обобщение представления Колосова – Мусхелишвили смещений и напряжений через две аналитические функции комплексного переменного. Рассмотрены все допустимые значения параметров упругости, в том числе, когда система (1) может быть вырожденной. Приведен пример решения задачи о нагружении постоянными усилиями плоскости с круговым отверстием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00679).

ЛИТЕРАТУРА

1. Остросаблин Н. И. *Общее решение и приведение уравнений линейной изотропной упругости к диагональному виду*. Сиб. журн. индустр. математики. 2009. Т. 12, № 2. С. 79–83.
2. Остросаблин Н. И. *Диагонализация системы статических уравнений Ламе линейной изотропной упругости*. Сиб. журн. индустр. математики. 2012. Т. 15, № 3. С. 87–98.

ОБ УПРАВЛЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕМ РАВНОВЕСНОМ ГАЗЕ

И. Б. Палымский¹, В. И. Палымский², П. А. Фомин³, А. В. Трифанов⁴

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

⁴Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова, Новосибирск

В течение последних десятилетий интенсивно изучались различные режимы конвекции химически инертной среды [1]. Но для технологических устройств более типична конвекция химически реагирующего равновесного газа, где благодаря процессам рекомбинации и диссоциации наблюдается существенное увеличение (в несколько раз) коэффициента теплового расширения β , что обуславливает конвективную неустойчивость и интенсификацию течения.

В работе используется модель химического равновесия [2], где плотность ρ химически равновесного идеального газа есть функция только абсолютной температуры T , так как внешнее давление P считается заданным и постоянным. Все численные значения констант соответствуют стехиометрической водородо-кислородной смеси.

Конвекция газовой смеси газов рассматривается в приближении Буссинеска. Показано, что результирующая система уравнений может быть получена из соответствующей системы [1] заменой числа Рэлея Ra на $C \cdot Ra$, где безразмерный коэффициент теплового расширения $C = C(T)$ определен процессами рекомбинации и диссоциации при выбранном T и заданном P .

Показано, что характеристики устойчивости относительно слабо изменяются при вариации давления (например, $C = 5.72$ при $P = 10^{-4}$ атм. и 2.14 при $P = 10^4$ атм.) поэтому управление интенсивностью конвекции при фиксированных Ra и Pr главным образом возможно путем выбора соответствующей температуры T и этим обусловленного изменения множителя C .

Рассмотрим зависимость $C = C(T)$ при $P = 1$ атм., показанную на рис. Четко виден связанный с максимальной интенсивностью конвекции локальный максимум, а при малой и большой температурах интенсивность конвекции уменьшается до минимума. Величина локального максимума максимальна при малом давлении и уменьшается до нуля монотонно при увеличении давления P .

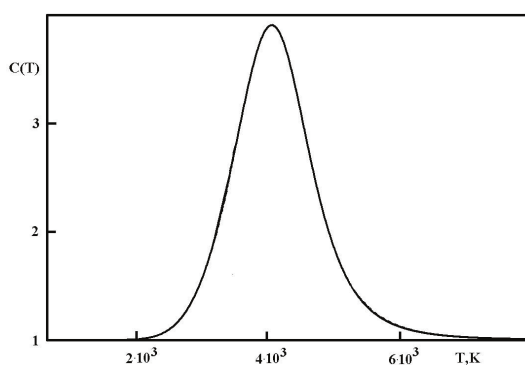


Рис. Множитель C как функция температуры

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-05166).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. *Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости*. М.: Наука, 1972.
2. Николаев Ю. А., Фомин П. А. *О расчете равновесных течений химически реагирующих газов*. ФГВ. 1982. Т. 18. № 1. С. 66–72.

О ПОДАВЛЕНИИ КОНВЕКЦИИ В ХИМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОМ РЕАГИРУЮЩЕМ ГАЗЕ ВПРЫСКОМ ИНЕРТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

В. И. Палымский¹, И. Б. Палымский², П. А. Фомин³, И. В. Фролов⁴

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

³Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

⁴Новосибирский государственный университет

В течение последних десятилетий интенсивно изучалась конвекция химически инертной среды [1]. Однако, для технологических устройств более типична конвекция химически равновесного реагирующего газа, в которой непрерывно протекающие процессы рекомбинации и диссоциации обуславливают существенное (в несколько раз) увеличение коэффициента теплового расширения β , что является источником конвективной неустойчивости.

Используется модель химического равновесия идеального реагирующего газа (стехиометрическая смесь водорода и кислорода) с инертными микрочастицами (Al_2O_3), где плотность ρ есть функция абсолютной температуры T и массовой концентрации частиц α ($0 \leq \alpha < 1$) [2]. Внешнее давление P предполагается постоянным.

Конвекция газа в плоском горизонтальном слое при подогреве снизу рассматривается в приближении Буссинеска, горизонтальные границы слоя предполагаются изотермическими и свободными от касательных напряжений.

Показано, что результирующая система уравнения может быть получена из соответствующей системы [1] заменой числа Рэлея Ra на $C \cdot Ra$, где безразмерный коэффициент теплового расширения $C = C(T)$ определен процессами рекомбинации и диссоциации и дополнительным множителем $C_1(\alpha)$ для члена тепловой диффузии, зависящим от концентрации микрочастиц. Последнее обстоятельство обуславливает уменьшение теплопроводности газа, увеличение критического числа Рэлея и подавление конвективного движения.

Рисунок показывает существование двух противоречивых тенденций. С одной стороны, протекающие химические процессы существенно (в 3.9 раза при $P = 1$ атм.) понижают критическое число Рэлея по сравнению с инертной средой (при $\alpha = 0$) и интенсифицируют конвекцию, а добавление микрочастиц также существенно (в 3.9 раза при $\alpha = 0.77$) повышают его значение и ее подавляют.

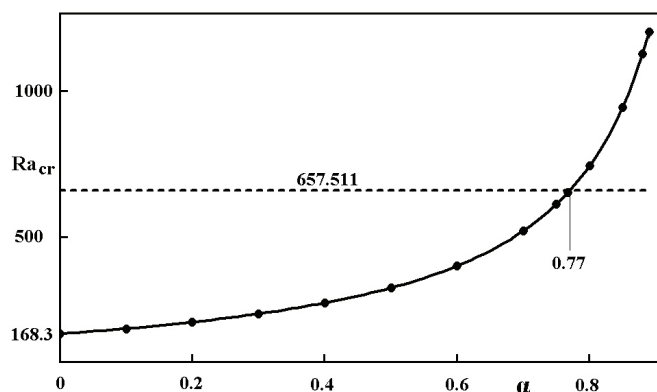


Рис. Критическое число Рэлея как функция волнового числа

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-05166).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. *Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости*. М.: Наука, 1972.
2. Федоров А. В., Фомин В. М., Тропин В. А., Фомин П. А., Чен Дж.-Р. *Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц*. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011.

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ СИНХРОННОЙ СТЕРЕОСЪЕМКИ И МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ ВЗРЫВНЫХ И БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Е. И. Пальчиков^{1,2}, А. В. Долгих^{1,2}, В. В. Клыпин^{1,2}, А. М. Рябчун^{1,2}, И. Ю. Красников¹.

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Приводятся принцип действия и особенности построения разработанного в ИГиЛ СО РАН аппарата для однократной импульсной рентгеновской съёмки взрывных и быстропротекающих процессов, созданного на основе трансформатора Тесла с сосредоточенной вторичной емкостью. Данная схема позволяет передавать в разрядную цепь аппарата большую энергию, чем в схеме с генератором Аркадьева-Маркса, и эффективнее работать с выносными трубками на коаксиальных кабелях.

Выходное напряжение 150-200 кВ, диапазон просвечиваемых толщин от 0,1 мм алюминия до 20 мм стали. Проводится сравнение основных характеристик аппарата с характеристиками зарубежных и отечественных аналогов.

Для синхронной съёмки протяженных или разнесенных в пространстве объектов, стереосъёмки или малоракурсной томографии аппарат оснащен несколькими трубками.

Возможные области использования аппарата — терминальная баллистика, баллистика ранений, исследование действия поражающих и защитных элементов стрелкового оружия, высокоскоростной удар, динамика кумулятивных струй, внутренняя динамика разлета осколков и поражающих элементов при подрыве мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швецов Г. А., Пальчиков Е. И., Матросов А. Д., Анисимов А. Г. *Динамическая радиография взрывных и быстропотекающих процессов*. Вопросы оборонной техники. Серия 14. «Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов». Вып. № 1. 2012. М.: Информтехника, с. 146-155.
2. Model 43733A. *Pulserad flash x-ray systems*. URL: <http://www2.1-3com.com/ati/pdfs/300kV.pdf>
3. *Scandiflash for High Speed Rapidography*. Hysbyborg, S-75590, Upsala, Sweden: Scanditronics, 1982. P. 1-6. URL: <http://www.scandiflash.com/tabell.htm>
4. Авилов Э. А., Балтаков Ф. Н., Завьялов Н. В., Канунов И. М., Полиенко Г. А., Пунин В. Т., Хорошайло Е. С., Юрьев А. Л. *Портативные импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией*. Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ. Научно-техническое издание. Выпуск 5. 2003. С. 190–195.

РАЗРЕШИМОСТЬ НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

А. А. Папин, М. А. Токарева

Алтайский государственный университет, Барнаул

Работа посвящена обоснованию математической модели движения вязкой жидкости в пороупругой среде. В основе модели лежат уравнения сохранения массы жидкости и пористого скелета, закон Дарси для жидкости, учитывающий движение пористого скелета, реологическое уравнение для пористости и уравнение равновесия [1, 2]:

$$\frac{\partial(1-\phi)\rho_s}{\partial t} + \operatorname{div}((1-\phi)\rho_s\vec{v}_s) = 0, \quad \frac{\partial(\rho_f\phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_f\phi\vec{v}_f) = 0,$$

$$\phi(\vec{v}_f - \vec{v}_s) = -K_0(\phi)\frac{k_0}{\mu}(\nabla p_f + \rho_f\vec{g}),$$

$$\nabla \cdot \vec{v}_s = -a_1(\phi)p_e - a_2(\phi)\left(\frac{\partial p_e}{\partial t} + \vec{v}_s \cdot \nabla p_e\right),$$

$$\rho_{tot}\vec{g} + \operatorname{div}\left((1-\phi)\eta\left(\frac{\partial\vec{v}_s}{\partial\vec{x}} + \left(\frac{\partial\vec{v}_s}{\partial\vec{x}}\right)^*\right)\right) - \nabla p_{tot} = 0,$$

$$p_{tot} = \phi p_f + (1-\phi)p_s, \quad p_e = (1-\phi)(p_s - p_f), \quad \rho_{tot} = \rho_f\phi + (1-\phi)\rho_s.$$

Здесь $\rho_f, \rho_s, \vec{v}_f, \vec{v}_s$ — соответственно истинные плотности и скорости жидкой и твердой фаз, ϕ — пористость, $p_f(\rho_f), p_s$ — соответственно давления жидкой и твердой фаз, p_e — эффективное давление; \vec{g} — плотность массовых сил, K_0 — тензор фильтрации, k_0 — проницаемость, μ — динамическая вязкость жидкости, $a_1(\phi), a_2(\phi)$ — параметры пороупругой среды, η — коэффициент вязкости твердой среды.

В докладе представлены результаты о разрешимости начально-краевых задач для приведенной системы уравнений [3–5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00291).

ЛИТЕРАТУРА

1. Morency C. Huismans R. S., Beaumont C. Fullsack P. *A numerical model for coupled fluid flow and matrix deformation with applications to disequilibrium compaction and delta stability*. Journal of Geophysical Research. 2007. V. 112.
2. Fowler A. *Mathematical Geoscience*. Interdisciplinary Applied Mathematics. 2011. V. 36.
3. Tokareva M. A. *Localization of Solutions of the Equations of Filtration in Poroelastic Medium*. Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. 2015. V. 8. № 4.
4. Tokareva M. A. *Solvability of initial boundary value problem for the equations of filtration in poroelastic media*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 722. № 1.
5. Ахмерова И. Г., Папин А. А., Токарева М. А. *Математические модели механики неоднородных сред*. Учебное пособие – Барнаул, 2012. Часть I.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕНКИ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Д. В. Паршин^{1,2}, Ю. О. Куянова²

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

²Новосибирский государственный университет

Интракраниальные аневризмы представляют собой сложный, с механической точки зрения, объект исследования. В зависимости от типа аневризмы ее стенка может иметь различную клеточную структуру, а геометрическая характеристика самой аневризмы зачастую играет ключевую роль в ходе нейрохирургических операций. В этой связи представляется важной задача исследования механических свойств стенки аневризмы. Удаленные в ходе нейрохирургических операций стенки интракраниальных аневризм доставлялись в лабораторию, где над ними была проведена серия экспериментов (аналогично [1]), в ходе которых были изучены механические свойства стенки аневризм различного характера (тромбированных и нетромбированных) и размера. Полученные свойства биологического материала были использованы для численного моделирования кровотока в окрестности церебральной аневризмы.



Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-01736) и частичной поддержке гранта Правительства Российской Федерации № 14.W03.31.0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cebal J. R., Duan X., Chung B. J., Putman C., Aziz K. and Robertson A. M. *Wall mechanical properties and hemodynamics of unruptured intracranial aneurysms*. AJNR. 2015. V.36. Pp. 1695–1703.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ТЕЙЛОРА ДЛЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА—КУКА

Н. В. Пахнutowa¹, А. С. Зелепугин^{1,2}, Ю. Ф. Христенко¹, С. А. Зелепугин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Томский научный центр СО РАН

Для оценки динамических характеристик материалов, прежде всего, динамического предела текучести, а также для выбора определяющих соотношений и подбора констант к ним часто используется процесс динамического взаимодействия тела цилиндрической формы с жесткой стенкой (недеформируемой преградой), называемый методом (задачей, тестом) Тейлора.

Метод Тейлора устанавливает связь динамического предела текучести с остаточной длиной цилиндрического тела после удара по недеформируемой преграде и традиционно используется для оценки динамических прочностных характеристик материала. Современный подход к анализу экспериментальных результатов в методе Тейлора состоит в получении в

результате численного моделирования геометрических форм, максимально близких к экспериментальным. Наиболее важным моментом при этом является применение адекватной модели поведения (определяющих соотношений) материала при динамических нагрузках. По сути, данная задача является базовой для комплексной оценки адекватности используемой модели материала и численной методики на ее основе, особенно в трехмерном случае.

В данной работе проведено численное моделирование задачи Тейлора на цилиндрических образцах из меди (М1). Численные расчеты выполнены методом конечных элементов в трехмерной постановке в рамках упругопластической модели среды. Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические движения среды с учетом влияния температуры на прочностные характеристики среды (модуль сдвига и динамический предел текучести) состояла из уравнений неразрывности, движения, энергии. Начальная скорость образцов диаметром 8 мм и длиной 32 мм варьировалась в диапазоне 150 – 350 м/с.

Проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными, полученными в НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета на одноступенчатой легкогазовой установке, в которой образец ускоряется сжатым газом (гелием), подаваемым из стандартного баллона (максимальное начальное давление 15 МПа). Среднее значение динамического предела текучести для этого материала определено как 414 МПа. Проведены сравнения формы образцов после нагружения, полученные в расчетах, с экспериментальными, на основании чего подобраны коэффициенты модели Джонсона - Кука.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-43-700774).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТУРБУЛЕНТНОЙ ИМПАКТНОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СТРУЕ

М. А. Пахомов, В. И. Терехов

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

Импактные струйные течения являются одним из наиболее часто встречающихся методов эффективного управления структурой течения, турбулентностью жидкости и теплообменом. Причиной этого является высокая интенсивность процессов переноса, обеспечиваемой особенностями струйных течений. Наиболее сильная интенсификация теплообмена экспериментально зафиксирована в двухфазных газочапельных и пузырьковых импактных струях. На газовую фазу в осредненном движении оказывает влияние локальная турбулентная структура (турбулентная дисперсия), а движение пузырьков влияет на турбулентность жидкости (модификация турбулентности). Численные результаты получены с использованием осесимметричного RANS подхода с учетом обратного влияния пузырьков на осредненные и пульсационные характеристики течения.

Показано увеличение интенсивности пульсаций скорости жидкости в двухфазном течении в сравнении с однофазным потоком. Рост диаметра дисперсной фазы вызывает увеличение турбулентности жидкости. Дополнительная генерация турбулентности объясняется вихреобразованием при обтекании потоком жидкости газовых пузырьков. Максимальное увеличение величины радиальных пульсаций наблюдается на расстоянии $r/(2R) = 2$. Далее по мере развития пристенной струи вдоль импактной поверхности за счет смешения пристенной струи

с окружающим пространством и всплытия воздушных пузырьков генерация турбулентности уменьшается и в пристенной области величина радиальных пульсаций в газожидкостном потоке близка к соответствующему значению для однофазного течения воды. Добавление воздушных пузырьков приводит к заметному росту трения на стенке в сравнении с однофазным течением. Наблюдаемое наличие двух максимумов в распределении локального трения на стенке объясняется небольшим расстоянием между импактной поверхностью и срезом трубы. Среди возможных причин наличия вторичного максимума в профиле трения и теплообмена указывается ламинарно-турбулентный переход при развитии пристенной струи вдоль импактной поверхности. Второй возможной причиной является взаимодействие крупномасштабных кольцевых структур, формирующихся в сдвиговом слое и движущихся в потоке, с импактной поверхностью. Также возможна и их комбинация. Все вышеперечисленные факторы приводят к локальному росту трения и теплопереноса при небольшом расстоянии от среза трубы до импактной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-03909а).

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В МАТЕРИАЛЕ С НЕЛИНЕЙНЫМИ КОНСТИТУЦИОНАЛЬНЫМИ СООТНОШЕНИЯМИ

А. А. Пекшева, Л. В. Степанова

Самарский национальный исследовательский университет им. академика

С.П. Королева, Самара

Целью данной работы является аналитическое решение задач определения напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в материале со степенными определяющими уравнениями. Одним из наиболее широко распространенных методов решения данного класса задач является метод разложения полей напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины по собственным функциям, который приводит к нелинейным задачам на собственные значения. Одно из собственных значений хорошо известно и соответствует классической задаче Хатчинсона – Райса – Розенгрена. В настоящее время в нелинейной механике разрушения показана необходимость отыскания всего спектра собственных значений и соответствующих им собственных функций для всех типов нагружения тела с трещиной (антиплоский и поперечный сдвиг, нормальный отрыв, смешанное нагружение). Согласно методу разложения по собственным функциям решение задачи разыскивается в форме произведения двух функций, одна из которых зависит от расстояния до кончика трещины, а другая является функцией полярного угла в полярной системе координат с полюсом в вершине трещины. Показатель степени радиальной координаты может быть интерпретирован как собственное значение, а функция, зависящая от полярного угла, – как собственная функция, отвечающая данному собственному значению. Необходимо найти собственное значение, которое отвечает нетривиальному решению системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. В работе с помощью метода малого параметра найдены аналитические

представления для собственных функций задач антиплоского сдвига, нормального отрыва, поперечного сдвига и смешанного нагружения тела с трещиной. Показано [1, 2], что рассматриваемый подход является эффективным методом решения нелинейных задач на собственные значения и техникой получения аналитических выражений не только для собственных значений, но и для собственных функций задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00571).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stepanova L. V., Yakovleva E. M. *Asymptotic stress field in the vicinity of a mixed-mode crack under plane stress conditions for a power-law hardening material*. Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2015. V. 10. № 3. Pp. 367–393.
2. Stepanova L., V., Igonin S. A. *Asymptotics of the near-crack-tip stress field of a growing fatigue crack in damage materials: Numerical experiment and analytical solution*. Numerical Analysis and Applications. 2015. V. 8. № 2. Pp. 168–181.

ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОЧИСТКУ ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЫ НЕФТЯНОГО ПЛАСТА

В. И. Пеньковский, Н. К. Корсакова

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

Бурение скважин на водных глинистых растворах приводит к проникновению водного фильтра в продуктивный пласт. Тем самым насыщенность прискважинной зоны нефтью уменьшается. При вызове притока путем снижения давления на скважине ниже начального пластового давления проникший фильтрат вытесняется не полностью, и часть его остается в поровом пространстве породы в неподвижном состоянии. Водное загрязнение зоны может возникать и в процессе эксплуатации скважины: вовлекаемая в движение природная пластовая вода накапливается на выходе из пласта, оставаясь в капиллярно запертом состоянии [1, 2]. Продуктивность скважины падает и, в зависимости от величины характерного капиллярного давления и депрессии на пласт, может стать гораздо меньше прогнозной.

В работе рассматриваются эффекты гистерезиса капиллярного давления и “старения” менисков. Применительно к условиям лабораторного эксперимента приводится решение задачи о фильтрации нефти в модели пласта с заданным гармонически изменяющимся во времени перепадом давления на торцах модели. Оценена величина зоны эффективного воздействия колебаний жидкости на очистку прискважинной зоны от возможного капиллярного запираания водной фазы.

Создана установка и проведены эксперименты, имитирующие откачку нефти из пласта с помощью широко применяемого на практике штангового насоса типа “качалка”. Модель пласта представляла собой щель, между пластинами, заполненная стеклянной крошкой, а в качестве рабочих жидкостей использовались природная нефть и раствор поваренной соли. Габариты модели 0,4 x 0,2 x 0,002 м. Размер зерен порядка 0,25–0,5 мм. Постоянный перепад давления на торцах 0,1 м. Амплитуда колебаний 0,75 м, круговая частота колебаний 2,5 сек⁻¹, время воздействия 1 час.

Эксперименты качественно подтверждают преимущества насосных установок типа «качалка» в сравнении с установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), создающими постоянное забойное давление на добывающей скважине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонцев С. Н., Доманский А. В., Пеньковский В. И. *Фильтрация в прискважинной зоне и проблемы интенсификации притока*. Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1989.
2. Данаев Н. Т., Корсакова Н. К., Пеньковский В. И. *Многофазная фильтрация и электромагнитное зондирование скважин*. Алматы: Эверо, 2014.

ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В СТРУЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

Б. В. Перепелица

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

В последнее время интерес к изучению микротечений значительно возрос, что связано, с развитием принципиально новых технологических устройств миниатюрных размеров. Одна из первых работ посвященных экспериментальному изучению микроструи при малых числах Re и влиянию акустики, является работа [1]. Авторы обнаружили новые явления при воздействии поперечного акустического поля на микроструи такие как, трансформация круглой микроструи в плоскую и явление раздвоения микроструи на две струи, развивающиеся независимо друг от друга. При этом, наблюдались совершенно подобные картины течения при различных параметрах.

В представленной работе приведены результаты визуальных исследований структуры круглой микроструи подверженной воздействию акустического поля. По данным фото и видео регистрации картины течения выявлены характерные особенности структуры ламинарной струи в акустическом поле.

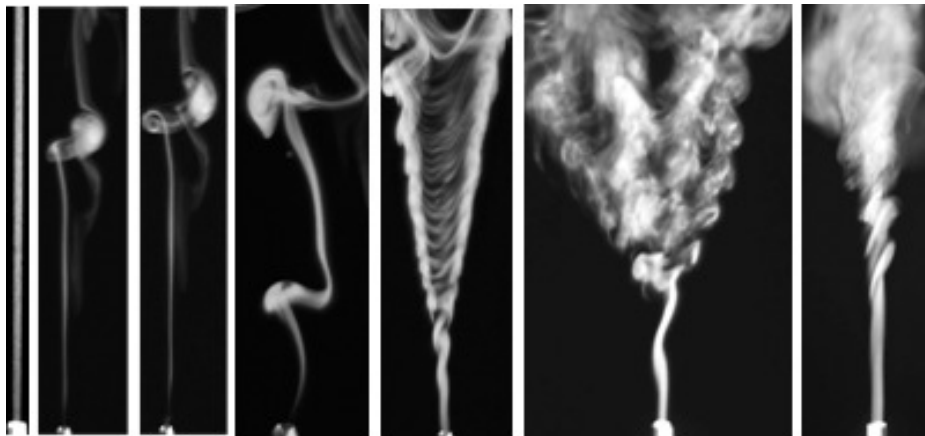


Рис. Картины дымовой визуализации течения круглой струи в присутствии поперечного акустического поля

Выявлен процесс образования конусообразных вихревых структур в ламинарной струе под действием акустического поля и колебательный режим течения струи и ее вращательное движение на выходе из трубки диаметром 1,35 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A. *Round and plane jets in a transverse acoustic field*. Journal of Engineering Thermophysics. 2011. V. 20. № 3. Pp. 1–181.

О ФОРМИРОВАНИИ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ В ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПОТОКЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

А. Г. Петров^{1,2}, Н. Д. Байков³

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

²Московский физико-технический институт

³Механико-математический факультет МГУ, Москва

В работе рассматриваются задачи численного моделирования формирования кумулятивных струй в плоско-параллельном потенциальном потоке идеальной несжимаемой жидкости. В начальный момент задается цилиндрическая полость и распределение на ней нормальной скорости. Простейшая постановка для цилиндра кругового сечения представлена в работе [1]. Алгоритм основан на методе граничных элементов. Основные соотношения для потенциала Φ и функции тока Ψ на границе области ∂S представлены ниже:

$$-2\pi\Psi(M, t) = \oint_{\partial S} G(M, M') \frac{\partial\Phi}{\partial s'}(M', t) ds' + \oint_{\partial S} \frac{\partial G}{\partial n'}(M, M')(\Psi(M', t) - \Psi(M, t)) ds',$$

$$G(M, M') := \frac{1}{2} \ln((x - x')^2 + (y - y')^2), \quad M(x, y), \quad M'(x', y') \in \partial S. \quad (1)$$

Предлагаемая численная схема отличается от ранее применяемых тем, что использует функцию тока вместо функции потенциала, квадратурные формулы без насыщения и неравномерную сетку со сгущением маркеров на участках с большой кривизной, причем расстояния между маркерами меняются пропорционально длине контура. Результаты некоторых расчетов приведены на рисунке.

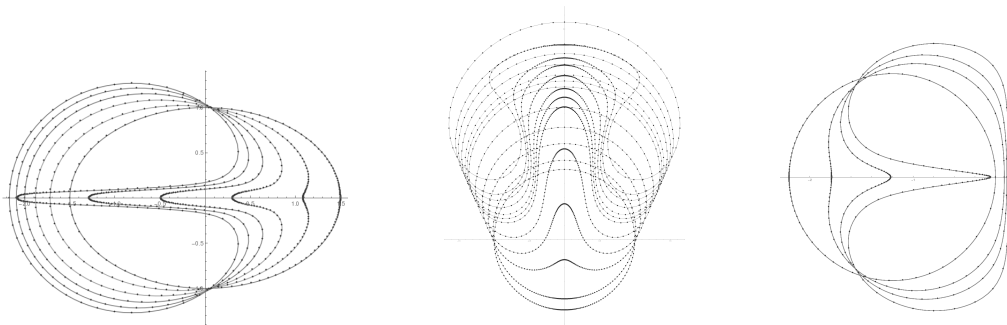


Рис. Эллиптическая полость; всплытие пузыря; деформация около стенки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-01-00901).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воинов О. В., Воинов В. В. *Численный метод расчета нестационарных движений идеальной несжимаемой жидкости со свободными поверхностями*. Доклады Академии наук СССР. 1975. Т. 221, № 3. С. 559–562.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОННЫХ ВОЛН

А. Г. Петров¹, И. И. Потапов²

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

²Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск

Разработана математическая модель обтекания периодической поверхности двумерным турбулентным потоком. Получено асимптотическое решение, позволяющее определить поле скорости и касательное напряжение при заданной периодической форме поверхности и высоты выступов шероховатости. Решение позволяет определять точки отрыва потока, линии тока и максимальное касательное напряжение на периодической обтекаемой поверхности.

Выявлены основные безразмерные комплексы, изменение которых определяет характер распределения касательного напряжения на периодической обтекаемой поверхности. Проведен сравнительный анализ, полученного решения для касательного придонного напряжения, который показал хорошее согласие решения с экспериментальными данными на напорных участках донных волн.

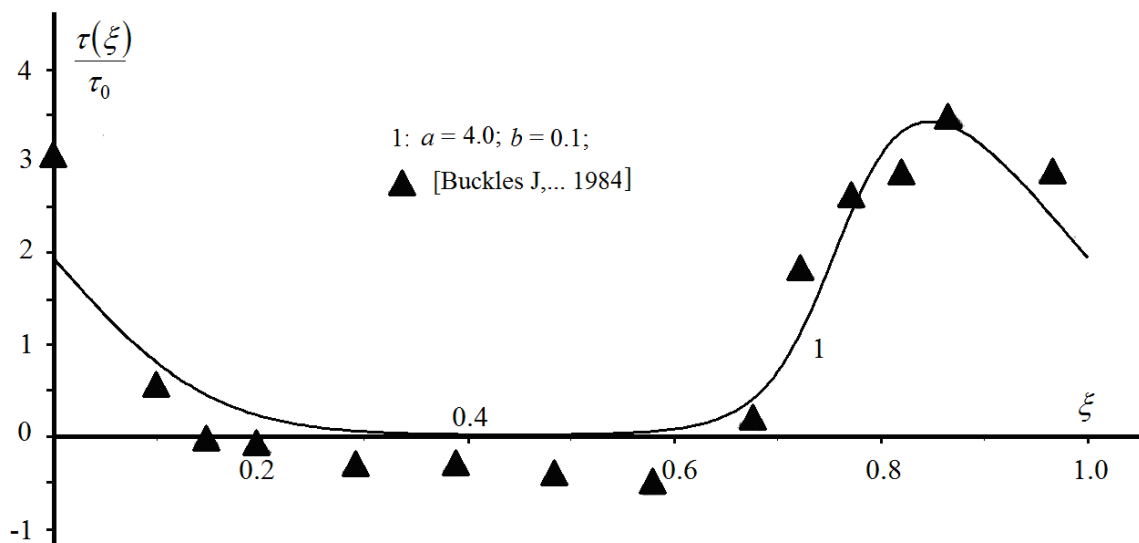


Рис. Сравнение полученного аналитического решения (кривая 1) и экспериментальных данных [Buckles Jeffrey,.. 1984]

Работа выполнена при поддержке комплексной программы фундаментальных исследований ДВО РАН, раздел 5.1.8 грант 15-I-4-070.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРА В ОГРАНИЧЕННОМ ВИХРЕВОМ ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ПОТОКЕ С ПОСТОЯННОЙ ЗАВИХРЕННОСТЬЮ

А. Г. Петров¹, М. А. Юдин^{2,3}

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

²Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, Москва

³Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный

Рассматривается система, состоящая из внутреннего цилиндра радиуса a , ось которого может свободно перемещаться, и внешнего цилиндра радиуса R , жестко закрепленного (на рисунке слева). Плоская область S между цилиндрами заполнена потоком несжимаемой невязкой жидкости с постоянной завихренностью ω и циркуляцией Γ .

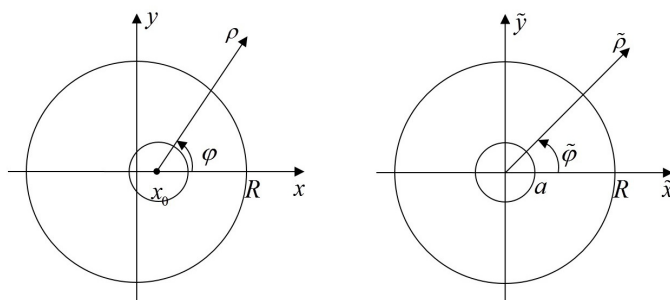


Рис. Рассматриваемая система(слева) и ее отображение(справа)

Для исследования устойчивости системы строится функция Лагранжа, следуя [1, 2]:

$$L = \rho \frac{1}{2} \int_S (\mathbf{v}_*^2 - (\mathbf{v} - \mathbf{v}_*)^2) dx dy + \frac{M v_0^2}{2}. \quad (1)$$

где M — масса и v_0 — скорость оси внутреннего цилиндра, \mathbf{v} — скорость жидкости и \mathbf{v}_* — скорость скрепленная с границей, которая может быть найдена из преобразования области S на кольцо S_* : $a < \tilde{\rho} < R$ (на рисунке справа), сохраняющего элемент площади. Методом функций Ляпунова получено условие неустойчивости системы в нелинейной постановке

$$M \geq M_*, \quad M_* = \frac{\pi(\Gamma^2(a^2 + R^2) - 4\omega\Gamma\pi a^2(a^2 + R^2) + 8\pi\omega^2 R^2 a^2)}{2(\Gamma - 2\pi a^2\omega)(\Gamma - 2\pi R^2\omega)}.$$

В противном случае доказана устойчивость. Условие неустойчивости $M > M_*$ ранее было получено в [3] из линейного приближения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01633).

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров А. Г. *Принцип Гамильтона и некоторые задачи динамики идеальной жидкости*. ПММ. 1983. Т. 47. № 1. С. 48–55.
2. Петров А. Г. *Аналитическая гидродинамика*. М: Физмалит, 2009.
3. Копьев В. Ф., Чернышев С. А., Юдин М. А. *Неустойчивость цилиндра при обтекании его циркуляционным потоком несжимаемой жидкости*. ПММ, 2017.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

И. М. Пешков^{1,4}, Е. И. Роменский^{1,2}, М. Думбсер³

¹Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Университет Тренто, Италия

⁴Институт математики Тулузы, Франция

В докладе обсуждается унифицированная модель механики сплошной среды, предложенная недавно в [1–3] для описания как динамики жидкостей (и газов), так и динамики твердых упруго-пластических сред в рамках единой системы гиперболических уравнений первого порядка. Рассматриваемая модель основана на уравнениях неупругой среды, предложенных в 1970-х [4, 5] С. К. Годуновым и Е. И. Роменским для описания упруго-пластических деформаций в металлах, однако, понимание того, что данные уравнения фактически способны описывать динамику произвольного континуума появилось лишь недавно. Модель допускает естественное обобщение, учитывающее взаимодействие сплошной среды при ее движении с электромагнитным полем, которое может быть получено на основе формализма термодинамически согласованных систем [3]. В докладе мы обсудим математическую модель и физические принципы, лежащие в ее основе. Будет также продемонстрировано применение модели для задач динамики вязких ньютоновских и неньютоновских жидкостей, упругих, а также упругопластических твердых сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Peshkov, I., Romenski, E. *A hyperbolic model for viscous Newtonian flows*. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2016. V. 28. № 1-2. Pp. 85–104.
2. Dumbser, M., Peshkov, I., Romenski, E., Zanotti, O., *High order ADER schemes for a unified first order hyperbolic formulation of continuum mechanics: Viscous heat-conducting fluids and elastic solids*. Journal of Computational Physics. 2016. V. 314. Pp. 824–862.
3. Dumbser, M., Peshkov, I., Romenski, E., Zanotti, O., *High order ADER schemes for a unified first order hyperbolic formulation of Newtonian continuum mechanics coupled with electrodynamics*. Electronic pre-print, arXiv. 2016. <http://arxiv.org/abs/1612.02093>
4. Godunov, S. K., Romenskii, E. I. *Nonstationary equations of nonlinear elasticity theory in Eulerian coordinates*. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1972. V. 6. Pp. 124–144.
5. Годунов С. К., Роменский Е. И. *Элементы механики сплошных сред и законы сохранения*. М.: Научная книга, 1998.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЗКИХ К РЕЗОНАНСНЫМ РЕЖИМОВ КОЛЕБАНИЯ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

С. В. Погудалина^{1,3}, Н. Н. Федорова^{2,3}, А. В. Федоров³

¹Новосибирский государственный технический университет

²НГАСУ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

³Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

При проектировании протяженных или высотных строительных сооружений, элементов летательных аппаратов необходимо учитывать их динамическое взаимодействие с внешним воздушным потоком. Явление аэроупругости изучается на протяжении многих лет как теоретическими, так и экспериментальными методами. В последние годы для исследования активно привлекаются методы компьютерного моделирования, которые позволяют получить детальную картину процесса и разработать способы предотвращения разрушения конструкций.

В работе представлены результаты моделирования колебаний упругого стержня, установленного по нормали к внешнему воздушному потоку и жестко закрепленного на подложке. Моделирование проведено в расчетном комплексе ANSYS с использованием технологии двунаправленного сопряжения (2FSI). Движение воздушной среды описывается на основе 3D нестационарных уравнений Навье-Стокса, а движение стержня — нестационарными уравнениями теории упругости с учетом геометрической нелинейности.

В предыдущей работе [1] авторами выполнен гидродинамический, сопряженный и модальный расчеты. Показано, что в первый временной период стержень совершает колебания с первой собственной частотой в направлении набегающего потока, амплитуда которых быстро затухает. В дальнейшем под действием периодической нагрузки, обусловленной формирующейся за стержнем вихревой дорожкой Кармана, развиваются колебания в поперечном направлении. При совпадении частот срыва вихрей с одной из собственных частот конструкции может возникнуть резонанс.

В работе представлены результаты расчетов сопряженной задачи при различных скоростях потока, геометрических параметрах и свойствах материала стержня. Проанализирована структура и описаны особенности вихревого течения воздуха в окрестности модели. Определено напряженно-деформированное состояние, получены собственные частоты и формы колебаний стержня. Исследованы режимы возбуждения поперечных колебаний, в том числе и близкие к резонансным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 15-07-06581-а).

ЛИТЕРАТУРА

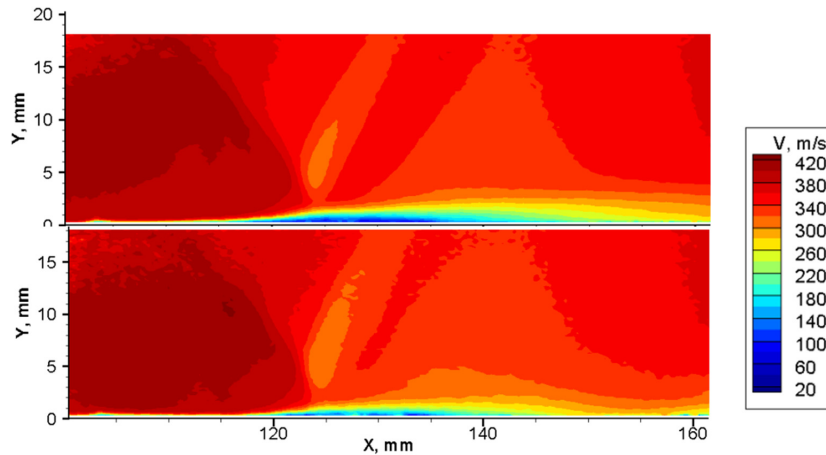
1. Погудалина С. В., Федорова Н. Н., Вальгер С. А. *Сопряженный расчет взаимодействия воздушного потока с упругим стержнем квадратного сечения, закрепленного на подложке*. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 5 (689). С. 11–20.

ПОДАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНОГО ОТРЫВА ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ЧИСЛЕ МАХА

П. А. Поливанов, А. А. Сидоренко

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

Одним из путей повышения топливной эффективности трансзвуковых летательных аппаратов является реализация ламинарного состояния пограничного слоя. Известно, что ламинарный пограничный слой хуже сопротивляется неблагоприятному градиенту давления (ударной волне) по сравнению с турбулентным случаем. Ламинарный отрыв потока способен существенно ухудшить характеристики самолета. В исследовании [1] было показано, что наименьшие потери в отрывной зоне происходят при переходном состоянии пограничного слоя (в зоне развития турбулентных пятен). В данном исследовании уровень набегающих возмущений контролировался искровым разрядом, что позволило управлять отрывным течением.



Поля скорости: разряд выключен (вверху), разряд включен (внизу)

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325 для числа Маха $M = 1.47$ и единичного числа Рейнольдса $Re_1 = 8 \cdot 10^6 m^{-1}$. Экспериментальная модель состояла из пластины с острой передней кромкой и клина, генерирующего ударную волну. Результаты PIV, полученные при энергии импульса в разряде $E_{dis} = 0.7$ мДж и $f = 18.2$ кГц показаны на рисунке. Хорошо видно, что использование разряда позволило существенно подавить отрывное течение. Для выполненных экспериментов эффективность использования разряда получилась равной 225%. Но расчеты работы [2] показывают возможность увеличения эффективности использования разряда более чем на порядок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-01134).

ЛИТЕРАТУРА

1. Polivanov P. A., Sidorenko A. A., Maslov A. A. *Transition Effect on Shock Wave / Boundary Layer Interaction at $M=1.47$* . AIAA Paper. 2015-1974.
2. Polivanov P. A., Sidorenko A. A., Maslov A. A. *Artificial turbulization of the supersonic boundary layer by dielectric barrier discharge*. ICAS. 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА С ПЕРЕДНЕЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОЙ ВСТАВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОПОРИСТОЙ ЯЧЕИСТОЙ СРЕДЫ

Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский, С. Г. Миронов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Развитие сверхзвуковой аэродинамики поставило задачу разработки новых методов управления аэродинамическими характеристиками сверхзвуковых летательных аппаратов. Одним из методов управления является использование газопроницаемых высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) [1].

Для разработки инженерных методов проектирования сверхзвуковых летательных аппаратов с пористыми элементами управления необходима модель пористой среды. В последнее время для получения гидравлических характеристик пористых сред применяется численное моделирование течения газа в скелете пористого материала (дискретная модель), не требующих привлечения эмпирических данных о фильтрационных свойствах пористого материала.

В настоящей работе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования сверхзвукового обтекания продольного потока цилиндра с передней вставкой из ВПЯМ (коэффициент пористости 95%). В численном моделировании на основе решения уравнений Навье – Стокса была реализована дискретная модель ВПЯМ в виде скелета из последовательно расположенных колец разного диаметра. Проведено сравнение континуального и дискретного подходов к описанию течения в пористой среде и выполнено сопоставление с экспериментальными данными, полученными в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327В ИТПМ СО РАН в широком диапазоне чисел Рейнольдса, длин пористой вставки, диаметров пор и отношения диаметра модели к диаметру пор ВПЯМ. Показано, что дискретная модель позволяет получить результаты, согласующиеся с экспериментальными данными, как по весовым измерениям аэродинамического сопротивления, так и по картинам шпирен-визуализации обтекания. В параметрических расчетах получена слабая зависимость величины аэродинамического сопротивления цилиндра с передней вставкой из ВПЯМ от чисел Маха и Рейнольдса и существенная зависимость от отношения диаметра модели к диаметру пор (масштабный критерий подобия).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-03867).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fomin V.M., Mironov S.G., Serdyuk K.M. *Reducing the wave drag of bodies in supersonic flows using porous materials*. Tech. Phys. Lett. 2009. V. 35. Issue 3. Pp. 117–119.

О ДИСПЕРГИРОВАНИИ ЖИДКОСТИ В КОАКСИАЛЬНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОВОЙ СТРУЕ

С. В. Поплавский¹, В. М. Бойко¹, В. В. Лотов¹, А. Ю. Нестеров²

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

²*Новосибирский государственный университет*

Применительно к задачам создания эффективных высокорасходных топливных форсунок экспериментально исследована структура сверхзвуковой газожидкостной струи. Ранее было установлено, что во всех внутренних газожидкостных течениях жидкость может находиться в трех основных состояниях: в виде капель, в виде спрея и как пленка на стенках каналов и сопел. Стекая с кромки сопла, пленка, разрушаясь, дает крупнодисперсную фракцию капель, которая ухудшает полноту сгорания. Кроме этого продукты дробления пленки затрудняют исследование основных процессов в ядре струи. В данной работе во избежание эффектов пленки жидкость подавалась сразу за срез конфузторного сопла, где диспергировалась газовым потоком, образуя двухфазное ядро коаксиальной газожидкостной струи.

Исследования выполнены на режимах $N_{pr}=4$ и $N_{pr}=6$, что в чисто газовых струях соответствует сверхзвуковым скоростям в ядре струи на значительном удалении от среза сопла (до 20 калибров). Оптическими методами получены новые данные о структуре газожидкостной струи на различных режимах: зарегистрировано поле скорости газа без жидкости (метод PIV), выполнена визуализация геометрии и волновой структуры струи с жидкостью и без нее (теневой метод), получены профили скорости жидкой фазы вдоль и поперек струи (метод LDA с прямым спектральным анализом), а также распределение капель по размерам (метод малоуглового рассеяния). Установлено, что в присутствии жидкости при сравнимых массовых расходах фаз сверхзвуковой режим течения сохраняется только в газовой оболочке коаксиальной струи, причем волновая картина первых ячеек существенно искажена в сравнении с чисто газовой струей. Впервые в газочапельных потоках с высокой концентрацией жидкости выполнены одновременные измерения скорости и размеров капель в одной точке. На основе анализа этих данных получены оценки характерных параметров подобия процессов диспергирования и параметров скоростной релаксации спрея в терминах чисел We и Re .

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ

В. А. Порязов, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет

В работе представлена физико-математическая модель горения металлизированного смесового твердого топлива (СТТ), в которой учитываются химические реакции в конденсированной и в газовой фазах. Модель строится на основе моделей, представленных в работах [1,2]. На поверхности горения, которая соответствует границе раздела фаз, ставятся граничные условия четвертого рода (условия сопряжения). В качестве объекта исследования выбрано

смесевое твердое топливо на основе перхлората аммония (ПХА) и связующего бутилкаучука. Проведено исследование зависимости скорости горения от величины и скорости сброса давления. Массовая доля алюминия в составе топлива 18% по массе, ПХА - 65%.

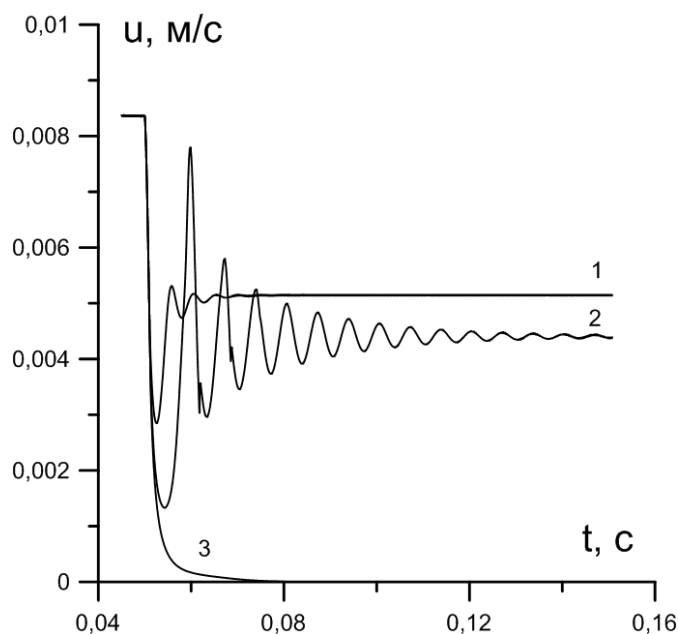


Рис. Изменение во времени скорости горения металлизированного СТТ при изменении давления со скоростью $60 \cdot 10^8$ Па/с; от давления 100 атм до давления 40 атм (1), 30 атм (2), 25 атм (3). Радиус частиц алюминия $R_{Al} = 10$ мкм

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9625.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Порязов В. А., Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А. *Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия*. ИФЖ. 2015. Т. 88, № 1. С. 93-101.
2. Порязов В. А., Крайнов А. Ю. *Численное моделирование погасания пороха Н при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения*. ФГВ. 2015. Т. 51, № 2. С. 47–52.

О ВОЛНАХ ДАВЛЕНИЯ В ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Е. Ю. Просвиряков

Институт машиноведения УрО РАН,
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева — КАИ

При исследовании течений в несжимаемой среде (жидкости или газе) одной из малоисследованных проблем гидродинамики является задача о распространении возмущения давления.

После формулировки данной задачи требуется найти ответ на другой вопрос: возможно ли самоподдерживающееся движение возмущений давления в вязкой несжимаемой жидкости.

Представляется, что такие гипотетические движения в несжимаемой жидкости вполне возможны, поскольку в этой среде давление определяется скоростью, которая неизбежно появляется при наличии градиента давления. Основная трудность исследования данных проблем гидродинамики несжимаемой жидкости заключается в том, что в системе уравнений Навье–Стокса, описывающих движения среды, нет эволюционного уравнения для давления и до настоящего времени его не удалось построить в качестве следствия выполнения законов сохранения. К тому же, общая зависимость давления от компонент скорости известна только для потенциальных течений (уравнение Бернулли) и для течений в магнитном поле (уравнение Грэда–Шафранова).

При исследовании указанных проблем использовался класс точных решений, применяемый при описании течений между параллельными пластинами. Точные решения были вычислены для течений вязкой несжимаемой жидкости вблизи оси, вдоль которой распространяется возмущение давления. В этом случае можно использовать известный класс точных решений уравнений движения. В этом классе решений вблизи оси, соединяющей середины пластин, перпендикулярные оси компоненты скорости малы и могут быть представлены в виде линейных комбинаций по поперечным координатам, с коэффициентами, зависящими от продольной координаты и времени, что приводит нас к замкнутой системе дифференциальных уравнений. Все найденные точные решения в рамках указанного класса проанализированы. Показано существование самоподдерживающихся волновых движений давления.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.1577.2017/ПЧ на выполнение проекта по теме “Численное и физическое моделирование аэродинамических и аэроакустических характеристик винтокрылых несущих систем перспективных летательных аппаратов”.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ СКОРОСТЕЙ ОТ ДВУХ КООРДИНАТ

Е. Ю. Просвиряков

*Институт машиноведения УрО РАН,
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева — КАИ*

В гидродинамике и ее многочисленных прикладных направлениях на протяжении многих лет важную роль играет класс точных решений, в котором поле скоростей линейно зависит от части координат:

$$V_x = U(z, t) + u_1(z, t)x + u_2(z, t)y, \quad V_y = V(z, t) + v_1(z, t)x + v_2(z, t)y, \quad V_z = w(z, t).$$

Координаты x и y называются горизонтальными или продольными, а z — вертикальной или поперечной. Большинство известных точных решений уравнений Навье–Стокса для различных сред, как известно, принадлежит этому классу точных решений.

Естественным оказывается вопрос о возможности представления поля скоростей в классе полиномиальных решений с более высокой степенью относительно горизонтальных координат. На этот вопрос ответ оказывается положительным. Для простоты восприятия приведем

сначала новый класс точных решений уравнений Навье-Стокса для квадратичного поля скоростей относительно координат x и y :

$$V_x = U(z, t) + u_{10}(z, t)x + u_{01}(z, t)y + u_{20}(z, t)\frac{x^2}{2} + u_{11}(z, t)xy + u_{02}(z, t)\frac{y^2}{2},$$

$$V_y = V(z, t) + v_{10}(z, t)x + v_{01}(z, t)y + v_{20}(z, t)\frac{x^2}{2} + v_{11}(z, t)xy + v_{02}(z, t)\frac{y^2}{2},$$

$$V_z = W(z, t) + w_{10}(z, t)x + w_{01}(z, t)y.$$

Давление в жидкости для представленного поля скоростей описывается полиномиальной формой четвертой степени, а для ползущих течений (течений Стокса и Озеена) — кубической формой.

При проведении дальнейшего исследования по обобщению нового класса точных решений уравнений-Навье-Стокса можно показать, что если степень скоростей V_x и V_y по x и y равняется $\deg_{x,y} V_x = \deg_{x,y} V_y = n$, то для вертикальной скорости степень равна $\deg_{x,y} V_z = n - 1$. В том случае, если описывается течение сильновязкой жидкости, степень полиномиального решения определяется формулой: $\deg_{x,y} P = n + 1$, а при учете инерционных (нелинейных) эффектов: $\deg_{x,y} P = n^2 - n + 1$.

Работа выполнена в рамках государственного задания №9.1577.2017/ПЧ на выполнение проекта по теме “Численное и физическое моделирование аэродинамических и аэроакустических характеристик винтокрылых несущих систем перспективных летательных аппаратов”.

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ В ПЛОХО ПЕРЕМЕШАННЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Е. С. Прохоров

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

Скорость фронта детонационной волны является важнейшей и наиболее значительной характеристикой взрывчатого вещества. Для взрывчатых газов существуют хорошо апробированные алгоритмы расчета параметров установившейся идеальной (без потерь на трение и теплообмен) детонации, часто называемой детонацией Чепмена—Жуге, которые основаны на предположении о химическом равновесии состава продуктов детонационного сгорания (продуктов детонации). Равновесные расчеты достаточно хорошо согласуются с опытными данными, прежде всего это касается скорости детонационного фронта D , измеряемой с высокой точностью в экспериментах.

Скорость детонации прежде всего зависит от химического состава взрывчатого газа, представляющего из себя смесь газообразных топлива и окислителя. На практике постоянство значения D можно обеспечить лишь в случае идеального перемешивания такой смеси. При распространении детонационной волны в плохо перемешанной газовой смеси, имеющей флуктуации химического состава, правильнее уже говорить о средней скорости детонации \bar{D} , поскольку скорость детонационного фронта также будет испытывать флуктуации. Вопрос насколько \bar{D} может отличаться от скорости детонации D в идеально перемешанной смеси остается открытым.

Такая задача представляет интерес в связи с вопросами взрывобезопасности, разработкой и модернизацией различных технических устройств, рабочим телом которых являются

продукты детонации. В подобных устройствах, работающих в непрерывном или импульсном (пульсирующем) режимах, взрывчатая газовая смесь формируется в условиях проточной подачи топлива и окислителя по двум независимым каналам. Понятно, что при таком способе формирования обеспечить полное перемешивания всех компонентов смеси довольно проблематично.

В данной работе предложена методика расчета средней скорости фронта плоской детонационной волны в плохо перемешанной смеси газообразного углеводородного топлива и окислителя (кислорода или воздуха). При этом полагали, что вдоль направления распространения детонации химический состав смеси имеет периодические флуктуации, например, за счет послойной стратификации газового заряда. Методика основана на анализе функциональной зависимости скорости идеальной детонации D от молярной доли (относительной молярной концентрации) топлива. Показано, что средняя скорость детонации \bar{D} может быть значительно (на 10-15 %) меньше скорости D . Это обусловлено тем, что зависимость скорости идеальной детонации от молярной доли топлива ведет себя не монотонно и имеет характерный максимум. Для плохо перемешанных газовых смесей получена аппроксимирующая формула, описывающая взаимосвязь средней скорости детонации и амплитуды флуктуаций химического состава.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА EFES

П. А. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный университет

В работе исследования проводятся численно, методом конечных элементов в трехмерной постановке с помощью авторского высокопроизводительного вычислительного комплекса EFES. Данный программный комплекс основан на трехмерном подходе к описанию поведения материалов и конструкций. По сравнению с ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, используемый в работе авторский комплекс EFES имеет ряд существенных преимуществ:

- в нем реализован оригинальный, максимально оптимизированный алгоритм расчета контактных границ, что особенно актуально при анализе конструкций сложной геометрии;
- реализован механизм “эрозионного разрушения” контактных элементов, что позволяет сохранять регулярность конечно-элементной сетки, при приемлемом шаге интегрирования;
- нет ограничений на количество процессоров (ядер) и количество конечных элементов, как правило, в ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA такие ограничения присутствуют.

Модели, используемые в вычислительном комплексе, позволяют описывать широкий спектр материалов: металлы, композиты на основе угле- и стеклопластиков, различные типы бетонов, с учетом анизотропии, пластичности, разрушения, влияния скорости деформации на

пластичные свойства материалов. Предложенные модели и алгоритмы были протестированы на многих экспериментальных данных, которые подтвердили их адекватность.

Метод конечных элементов (МКЭ) получил широкое применение для решения контактных динамических задач механики твердого деформируемого тела. МКЭ основан на лагранжевом подходе к описанию деформирования сплошной среды и позволяет точно описывать контактные границы. Но в случае больших деформаций и разрушения неизбежно появление “неправильных” элементов, которые весьма затрудняют численные исследования.

В существующих программных продуктах реализован ряд алгоритмов расчета контактного взаимодействия тел при решении динамических задач методом конечных элементов. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Как правило, такие программные комплексы включают готовые сеточные генераторы. Процесс создание и особенно оптимизации сетки является нетривиальной задачей. Для качественного решения задачи методом конечных элементов важно, чтобы масса в узлах сетки была распределена равномерно, и чтобы размеры расчетных ячеек были близки. В работе предлагается алгоритм описания разрушения контактных элементов, обеспечивающий выполнение всех законов сохранения и проведения расчетов для больших деформаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-31-00125 мол-а, грант № 16-38-00256 мол-а), а также гранта Президента РФ МК-413.2017.1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛИТ ИЗ СПЛАВОВ В95 И В-1461 В РЕЖИМАХ ПОЛЗУЧЕСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТА “ОКБ “СУХОГО”

Г. А. Раевская¹, К. В. Захарченко^{2,3}, А. Ю. Ларичкин^{2,4}

¹Научно-технический центр “НТЦ-Ползучесть”, Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Новосибирский государственный технический университет

⁴Новосибирский государственный университет

В работе представлены результаты исследования параметров формообразования толстых плит (40 мм) из высокопрочных сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) в режимах ползучести на установке УФП-1М (НАЗ им. В. П. Чкалова) [1]. Предварительная отработка режимов формообразования выполнялась на балках прямоугольного сечения при нагружении их чистым изгибом.

На основании выполненных исследований определены: температура, время и количество этапов формообразования. Полученные данные обеспечивают установившуюся ползучесть в процессе деформирования, полную релаксацию напряжений и отсутствие пружинения. Контроль отклонений полученной поверхности плиты от заданной электронной модели (рис. 1 а) показал (бесконтактная система MV 224) минимальное расхождение (рис. 1 б), что составляет не более 5 мм. Получена предварительная оценка прочностных свойств и исследована микроструктура материала, до и после техпроцесса.

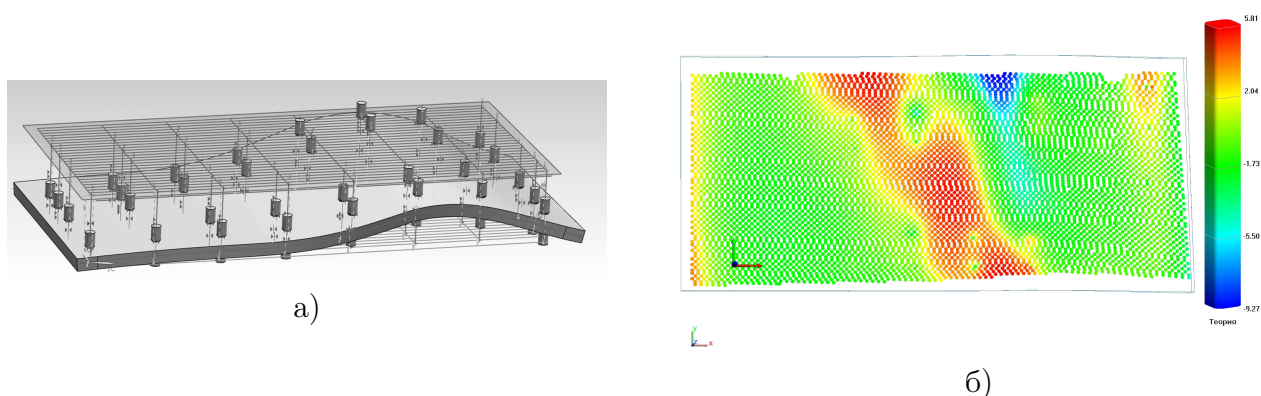


Рис. 1: а - электронная модель образца, б - отклонения от теоретической формы.

Это дает технологическую возможность использовать в обработке металлов давлением технологию формообразования толстых монолитных панелей в режимах ползучести, близких к сверхпластичности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 16-08-00713, 16-31-00460).

ЛИТЕРАТУРА

1. Миодушевский П. В., Раевская Г. А., Соснин О. В. *Способ формообразования деталей и устройство для его осуществления*. Патент №2056197. Россия. В21D11/20. 1996.

АНАЛИЗ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РИФЛЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

С. С. Рассоха, С. В. Ладов, А. В. Бабкин

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

Основной особенностью рифленых конических оболочек является наличие на их боковой поверхности чередующихся выступов и углублений [1].

В процессе обжатия такой оболочки она приобретает вращательное движение вокруг оси симметрии, которое было проанализировано с использованием аналитического подхода и численных методов механики сплошной среды.

Показано, что причиной возникновения вращения является зависимость давления на поверхности оболочки от ее угла наклона по отношению к фронту падающей косоугольной ударной волны. Кроме того показано, что образующаяся из такой оболочки струя вращается и может менять знак угловой скорости при монотонном изменении геометрических размеров оболочки. Построена аналитическая модель, которая позволяет вычислить угловую скорость вращения ребренной оболочки и образующейся струи. С использованием численных методов проанализировано влияние на угловую скорость оболочки свойств ее материала и размеров поперечного сечения.

Полученные зависимости удовлетворительно совпадают с известными экспериментальными данными [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Eichelberger R. J. *Critical Review of Shaped Charge Information*. Ballistic Research Laboratories Report № 905. Edited by L. Zernov. Maryland: Aberdeen Proving Ground. 1959. 347 p.
2. Koch A., Jaggy P., Jaun W., Haller F. *Study of Spin-Compensated Shaped Charges*. Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics. Interlaken (Switzerland). 2001. Pp. 1501–1508.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ НА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ ГРАНИЦЕ

Е. В. Резанова

Алтайский государственный университет, Барнаул

Изучается задача о стекании тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости по наклонной, твердой, непроницаемой подложке в двумерном случае. При моделировании учитываются капиллярные, термокапиллярные, гравитационные эффекты, действие дополнительных касательных напряжений со стороны внешней среды и испарение жидкости. Представлены односторонние математические модели течений тонких слоев испаряющейся жидкости, основанные на длинноволновом приближении уравнений Навье-Стокса и переноса тепла, и уравнений Обербека-Буссинеска [1] при использовании обобщенных кинематического, динамического, энергетического условий на термокапиллярной границе [2] и соотношения, определяющего локальный поток массы [3, 4]. На твердой подложке заданы условия прилипания и распределение температуры. Сформулированы начальные условия и условия на бесконечности. Рассмотрены случаи умеренных ($Re = O(1)$) и больших ($Re = O(1/\varepsilon)$) чисел Рейнольдса (ε — малый параметр задачи, отношение поперечной характерной длины к продольной). Проведен параметрический анализ задачи для систем “жидкость-газ” типа “этанол-азот”, “НФЕ7100-азот”, “ФС72-азот”.

Положение границы раздела определяется с помощью эволюционного уравнения, являющегося следствием кинематического условия на границе раздела.

Численное решение данного уравнения осуществляется с помощью неявной конечно-разностной схемы, реализуемой методом пятиточечной прогонки и прогонки с параметром. Численно исследовано периодическое стекание жидкостей типа этанол и НФЕ7100. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью уравнений Навье-Стокса и Обербека-Буссинеска, учитывающих влияние сил плавучести на динамику слоя и процессы испарения. Изучено влияние гравитационных полей различной интенсивности, угла наклона и характера нагрева подложки на структуру течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00291).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончарова О. Н., Резанова Е. В. *Построение математической модели течений в тонком слое жидкости на основе классических уравнений конвекции и обобщенных условий на границе раздела*. Известия АлтГУ. 2015. Т. 85. № 1/1. С. 70–74.

2. Гончарова О. Н. *Моделирование течений в условиях тепло- и массопереноса на границе*. Известия АлтГУ. 2012. Т. 73. № 1/2. С. 12–18.
3. Oron A., Davis S.H., Bankoff S.G. *Long-scale evolution of thin liquid films*. Reviews of Modern Physics. 1997. V. 69. № 3. Pp. 931–980.
4. Miladinova S., Lebon G., Slavtchev S., Legros J.-C. *The effect of non-uniform heating on long-wave instabilities of evaporating falling films*. In: Proc. 6th Workshop on Transport Phenomena in Two-Phase Flow, Bourgas'2001, 11-16 Sept. 2001, Bourgas, Bulgaria, (Ed. by Ch. Boyadjiev and J. Hristov). Pp. 121–128.

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ СУБСТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЧНОСТИ МАКРОНЕОДНОРОДНЫХ СРЕД В СЛУЧАЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Б. С. Резников, К. А. Кузьмин

Новосибирский Государственный Технический Университет

В современных композитах, где в качестве армирующих элементов используются существенно анизотропные кристаллические включения, “усы”, углеродные и борные волокна и т.д., анализ влияния анизотропии свойств фазовых материалов на начальное разрушение структурно-неоднородной среды является актуальной задачей.

В настоящей работе на основе математической модели многофазной среды (с продольно-поперечным расположением фаз) [1] и алгоритма расчета прочности при комбинированном нагружении [2] предложена методика анализа предельного состояния композита, которая позволяет учитывать внутреннюю структуру материала и анизотропию механических свойств субструктурных элементов. При этом материалы элементов фаз подчиняются условию прочности П. П. Баландина [3].

Проведено численное исследование условия прочности композитов в пространстве параметров внешнего воздействия (при изотермическом нагружении в случае плоского напряженного состояния). Разработанный программный комплекс позволяет учитывать влияние на условие начального разрушения композита: структуру среды (количество, удельное объемное содержание и пространственное расположение продольных и поперечных фаз) и анизотропию физико-механических характеристик материалов элементов композиции.

Таким образом, предложенный подход позволяет прогнозировать предельное состояние композитов, а тем самым целенаправленно проектировать структурно - неоднородные материалы с требуемыми прочностными характеристиками по условиям эксплуатации для конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резников Б. С., Никитенко А. Ф., Кучеренко И. В. *Прогнозирование макроскопических свойств структурно-неоднородных сред. Сообщение 1*. Изв. вузов. Строительство. 2008. № 2. С. 10–17.

2. Резников Б. С. *Прогнозирование разрушения кольцевых пластин с учетом реальной структуры и стохастической природы материала*. Краевые задачи и их приложения: Тр. Чуваш. гос. ун-та. 1989. С. 89–99.
3. Баландин П. П. *К вопросу о гипотезах прочности*. Вестн. инженеров и техников. 1937. № 1. С. 19–24.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОТОКЕ СМЕСИ КОЛЕБАТЕЛЬНО ВОЗБУЖДЕННЫХ ГАЗОВ

А. И. Решетова, Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский, И. С. Цырюльников

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СОРАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

В работе проведено численное исследование влияния звукопоглощающих покрытий на интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины ($L = 0,4\text{ м}$), обтекаемой гиперзвуковым колебательно-возбужденным потоком ($M_\infty = 8,42$, $Re_1 = 1,36 \cdot 10^6$, $P_\infty = 371,5\text{ Па}$, $T_0 = 2430\text{ К}$, $T_\infty = 215\text{ К}$) смеси CO_2 (0,44) и N_2 (0,56) при условиях экспериментов, проводимых в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СОРАН.

Численное моделирование выполнено на базе решения двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса в рамках модели термически совершенного газа. Для описания звукопоглощающего покрытия из вспененного никеля с коэффициентом пористости 0,95 используется модель скелета пористого материала (дискретная модель пористой среды) с включением геометрии покрытия в расчетную область. Для учета влияния колебательной релаксации молекул CO_2 к уравнениям Навье – Стокса добавлены уравнения сохранения колебательной энергии для каждой колебательной степени свободы молекул. Учет энергообмена между колебательными и поступательно-вращательными степенями свободы молекул CO_2 с конечным временем релаксации производился добавлением в уравнения сохранения колебательной энергии источниковых членов, рассчитываемых по уравнению Ландау – Теллера. При этом учитывалось два канала колебательной релаксации молекул CO_2 при взаимодействии их друг с другом и при взаимодействии с молекулами азота. Акустические возмущения моделировались заданием суперпозиции стационарного течения и плоских монохроматических акустических волн.

Для гиперзвуковых ударных слоев получены данные по динамике развития возмущений на пластине, обтекаемой гиперзвуковым потоком колебательно возбужденной смеси CO_2 и N_2 при разных углах атаки $\alpha = 5 \div 20^\circ$. Результаты расчетов верифицированы сравнением с экспериментальными данными по интенсивности пульсаций давления на поверхности пластины. Показано, что звукопоглощающие пористые покрытия, независимо от их местоположения на поверхности, эффективно подавляют пульсации давления при обтекании тел колебательно-возбужденными газами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00674).

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КРУГЛЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ С УВЕЛИЧЕННОЙ ДЛИНОЙ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА

А. И. Решмин¹, Ю. С. Зайко^{1,2}, А. Д. Сударикова^{1,2}, С. Х. Тепловодский¹

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

²*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*

В работе представлен метод формирования затопленных струй с удлиненным ламинарным участком посредством компактного устройства. Создаваемая струя диаметром 0.12 м экспериментально исследована в диапазоне чисел Рейнольдса 2000–13000. Показано, что длина ламинарного участка на оптимальном режиме скорости достигает 5.5 диаметров струи. Начальный участок подобной струи представляет интерес для исследования развития неустойчивости в свободных ламинарных струях и, кроме того, может применяться для газодинамической защиты объектов в медицине и высокоточной промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00115).

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЧЛЕНОВ В ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С НАЧАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т. А. Ротанова, С. Н. Коробейников

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

Начальные напряжения могут оказывать существенное влияние на распределение напряжений в деформированном теле. Многие исследователи используют для учета начальных напряжений упрощенные формулировки уравнений деформирования [1]. Более полное описание нелинейного деформирования с учетом предварительных напряжений предложено в работах [2], [3]. В упрощенных моделях не учитываются нелинейные члены, представляющие собой произведение компонент тензора напряжений и компонент тензора градиента приращений перемещений. Недооценка данных членов может привести к недостоверным расчетам, особенно в точках с резким изменением геометрии. Учет влияния предварительных напряжений в породе на распределение напряжений при моделировании процесса образования горных выработок зачастую основан на первом, упрощенном подходе. Однако в приложении к задачам горных пород актуально исследование влияния начальных напряжений с учетом нелинейных членов вследствие имеющегося в породе на глубине давления. При использовании недостоверной модели возможно искажение картины деформирования породы, которое может привести к катастрофическим результатам.

Наш подход основан на использовании нелинейных уравнений гипопругости, учитывающих отмеченные выше нелинейные члены.

Компьютерное моделирование определения напряжений в горных выработках проведено с помощью “домашнего” кода PIONER [4] для различных глубин залегания выработок, с использованием как первой, так и второй формулировок задачи. Показано, при каких глубинах

следует учитывать нелинейные члены для обеспечения достоверности получаемых результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-01635).

ЛИТЕРАТУРА

1. Coussy O. *Poromechanics*. Chichester: J. Wiley and Sons, 2004.
2. Biot M. A. *Mechanics of incremental deformations*. N.-Y.: J. Wiley and Sons, 1965.
3. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. М.: Мир, 1987.
4. Korobeinikov S. N., Agapov V. P., Bondarenko M. I., Soldatkin A. N. *The general purpose nonlinear FE structural analysis program PIONER*. In: Proceedings of the International Conference on Numerical Methods and Applications, edited by B. Sendov et al., Publ. House of the Bulgarian Acad. of Sci. 1989. Pp. 228–233.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ УПРУГОГО ТЕЛА, АРМИРОВАННОГО ТОНКИМ УПРУГИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Е. М. Рудой, В. В. Щербаков

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

Рассматривается краевая задача, описывающая равновесие двумерного линейно-упругого тела с тонким прямолинейным упругим включением и возможным отслоением. Для описания напряженно-деформированного состояния включения используются уравнения теории упругих балок Бернулли–Эйлера. Наличие отслоения означает существование трещины между включением и упругой матрицей. На берегах трещины задаются нелинейные краевые условия, исключающие взаимное проникание берегов, что приводит к задаче с неизвестной областью контакта. Предложен итерационный алгоритм численного решения задачи, основанный на методе декомпозиции области и алгоритме Удзавы решения вариационных неравенств. Приведены результаты расчетов, иллюстрирующие эффективность предложенного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khludnev A. M., Leugering G. *Delaminated thin elastic inclusion inside elastic bodies*. Mathematics and Mechanics of Complex Systems. 2014. V. 2. № 1. Pp. 1–21.
2. Rudoy E. M. *Domain decomposition method for crack problems with nonpenetration condition*. ESAIM-Math. Model. Num. 2016. V. 50. № 4. Pp. 995–1009.
3. Shcherbakov V. V. *Energy release rates for interfacial cracks in elastic bodies with thin semirigid inclusions*. Z. Angew. Math. Phys. 2017. V. 68. Article 26.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ ВОДОРОД-ВОЗДУХ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

А. И. Рыбников, Е. В. Симонов, С. А. Ждан

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

Экспериментальные исследования непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме Б. В. Войцеховского [1] в камерах сгорания (КС) различной геометрии обобщены в [2]. Они могут служить хорошей основой для проверки различных математических моделей НСД. В данной работе сформулирована двумерная газодинамическая модель НСД с двухстадийной химической кинетикой [3] для смеси водород — воздух, описывающая динамику процесса в проточной кольцевой цилиндрической КС, получены численные решения задачи и проведена верификация математической модели на экспериментальных данных [4] в ДК-300 внешним диаметром $d_c = 30.6$ см, длиной $L_c = 66.5$ см и шириной кольцевого канала $\Delta = 2.3$ см для стехиометрической ($\phi = 1$) ТВС водород — воздух с удельным расходом смеси $g_\Sigma = 75.6$ кг/(с · м²). Решалась периодическая задача с периодом $l = P = 88.91$ см, равным периметру $P = \pi \cdot (d_c - \Delta)$ КС в срединном ее сечении.

Результаты расчетов. В начальный момент времени ($t = 0$) в области решения мгновенно выделялась энергия, достаточная для инициирования детонации. В результате по КС распространялась поперечная детонационная волна (ПДВ). Через $t \approx 10$ мс, когда ПДВ прошла расстояние около 30 периодов задачи, получен выход на самоподдерживающийся режим НСД со скоростью детонации $D \approx 1.95$ км/с, частотой вращения ПДВ $f \approx 2.2$ кГц и высотой фронта ПДВ $h \approx 8,1$ см. Проверка на "паразитность" полученного периодического решения НСД проводилась последовательным уменьшением в расчетах периода задачи до $l = 0.6 P$, когда наблюдался срыв ПДВ и ее затухание. Последнее означает, что при указанных выше параметрах двухволновой режим НСД не существует. Это соответствует [4], где при $\phi = 1$ и расходе $g_\Sigma = 75.6$ кг/(с · м²) реализован одноволновой ($n = 1$) режим НСД. Однако, следует заметить, что в экспериментах $D \approx 1.4$ км/с, $f \approx 1.5$ кГц и $h \approx 24$ см. Проведен анализ различий расчетных и экспериментальных данных и намечены пути дальнейшего совершенствования физико-математической модели НСД в топливно-воздушной смеси водород — воздух.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. *Стационарная детонация*. Докл. АН СССР. 1959. Т. 129, № 6. С. 1254–1256.
2. Быковский Ф. А., Ждан С. А. *Непрерывная спиновая детонация*. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2013.
3. Николаев Ю. А., Зак Д. В. *Согласование моделей химических реакций в газах со вторым началом термодинамики*. ФГВ. 1988. Т. 24, № 4. С. 87–90.
4. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. *Непрерывная спиновая детонация смесей топливно-воздушных смесей*. ФГВ. 2006. Т. 42, № 4. С. 107–115.

ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

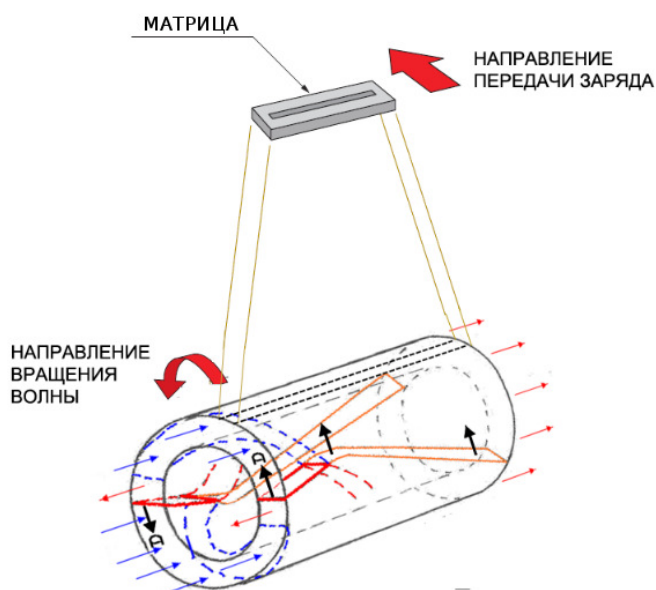
А. Н. Самсонов¹, Х. В. Самойлова²

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

²Новосибирский государственный университет

Доклад описывает процесс испытаний устройства разработанного специально для видеосъемки детонационных волн, достигающего большей кадровой частоты, благодаря выборочному считыванию строк светочувствительной матрицы. Таким образом, максимальная кадровая частота определяется светимостью объекта и временем экспозиции, но не связана напрямую со скоростью чтения данных с сенсора. В то время как именно этот фактор ограничивает кадровую частоту видеокамер Photron.

Целью данной работы было создание цифрового устройства видеосъемки, позволяющего зарегистрировать детонационные волны, движущиеся со скоростью около 2 км/с. Особенность процесса делает необходимым считывание только одной строки сенсора, в то время как все современные видеокамеры рассчитаны на обработку не менее восьми-шестнадцати строк одновременно.



В процессе разработки выяснилось, что использование светочувствительной линейки не является оптимальным решением, поскольку выбор высокоскоростных КМОП-линеек ограничивается скоростью в 100-180 тысяч строк в секунду, что недостаточно для решения поставленной задачи. В результате поиска необходимой компонентной базы были найдены светочувствительные матрицы с российскими корнями, позволяющие добиться строчной частоты превышающей максимальную частоту видеокамеры Photron-SA4, то есть более 775 кадров в секунду.

Разработанное программное обеспечение позволяет получать данные с устройства, сохранять и отображать их на экран. В работе описывается процесс испытаний разработанного

устройства, анализируются полученные характеристики и способы повышения кадровой частоты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 10-08-00225, 14-08-00080) и Программой отделений РАН №1.1.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быковский Ф. А., Ждан С. А. *Непрерывная спиновая детонация*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ КОНТАКТА

Ш. В. Сандуляну

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассматривается задача взаимодействия двух пульсирующих газовых пузырьков в идеальной несжимаемой жидкости. Радиусы пузырьков равны a_1 и a_2 , расстояние между их центрами равно $x = x_2 - x_1$, скорости центров равны u_1 и u_2 соответственно, направлены друг к другу (см. рис.). Кинетическая энергия жидкости имеет вид [1]

$$\frac{T}{2\pi\rho} = A_1 u_1^2 + 2B u_1 u_2 + A_2 u_2^2 + D_1 \dot{a}_1^2 + 2E \dot{a}_1 \dot{a}_2 + D_2 \dot{a}_2^2 + C_{11} u_1 \dot{a}_1 + C_{12} u_1 \dot{a}_2 + C_{21} u_2 \dot{a}_1 + C_{22} u_2 \dot{a}_2,$$

где ρ — плотность жидкости, коэффициенты $A_1, B, A_2, \dots, C_{22}$ находятся как суммы бесконечных рядов, зависящих от x, a_1, a_2 . Впервые данное выражение было получено Воиновым [1] с помощью метода отражения диполей, предложенного Хиксом. Точно такое же выражение было получено мною, используя бисферические координаты и полиномы Гегенбауера, при этом ряды полученные мною отличаются от рядов полученных Воиновым, в тоже время суммы рядов совпадают.

Из главной асимптотики $T = 4\pi\rho a_1^2 a_2^2 \dot{a}_1 \dot{a}_2 / x$ при $x \gg a_1, a_2$, следует классическая формула Бьеркнеса

$$F_B = \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4\pi\rho}{x^2} a_1^2 a_2^2 \dot{a}_1 \dot{a}_2.$$

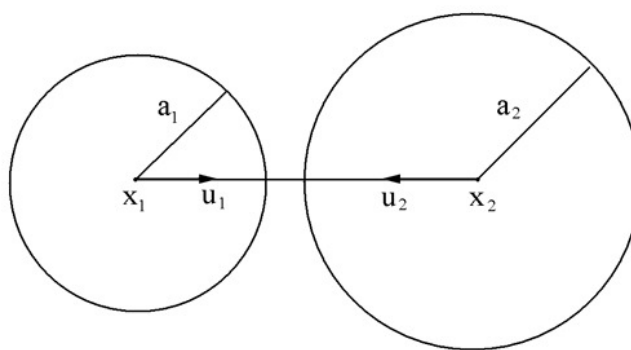
Вблизи контакта главные асимптотики коэффициентов $A_1, B, A_2, \dots, C_{22}$ оказались равны между собой и равны

$$\frac{a_1^2 a_2^2}{4(a_1 + a_2)} \left(\frac{x}{a_1 + a_2} - 1 \right) \ln \left(\frac{x}{a_1 + a_2} - 1 \right),$$

при этом главная асимптотика силы Бьеркнеса сменяется на логарифмическую особенность

$$F_B \propto \frac{a_1^2 a_2^2}{4(a_1 + a_2)^2} \ln \left(\frac{x}{a_1 + a_2} - 1 \right).$$

Данная логарифмическая зависимость показывает, что вблизи контакта недостаточно искать кинетическую энергию в разложении до определенного порядка по расстоянию x .



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01633).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воинов О. В., Петров А. Г. *Движение пузырей в жидкости*. Итоги науки и техники. Гидромеханика. М.: ВИНТИ. 1976. Т. 10. С. 86–147.

ЗАДАЧИ ГРАНИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ–ДИФФУЗИИ–РЕАКЦИИ

Ж. Ю. Сарицкая¹, Р. В. Бризицкий^{1,2}

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

²Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

В ограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ с границей Γ , состоящей из двух частей Γ_D и Γ_N , рассматривается краевая задача

$$-\lambda \Delta \varphi + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi + k\varphi = f \text{ в } \Omega, \quad \varphi = \psi \text{ на } \Gamma_D, \quad -\lambda(\partial \varphi / \partial n + \alpha \varphi) = \chi \text{ на } \Gamma_N. \quad (1)$$

Здесь функция φ имеет смысл концентрации загрязняющего вещества, \mathbf{u} — заданный вектор скорости, f — объемная плотность внешних источников вещества, λ — постоянный коэффициент диффузии, k — коэффициент реакции, функция $\alpha = \alpha(\varphi, \mathbf{x})$ имеет смысл коэффициента массообмена.

Предложена операторная конструкция коэффициента массообмена α , при которой пропускная способность участка $\Gamma_N \subset \Gamma$ зависит как от концентрации вещества в окрестности Γ_N , так и от пространственных переменных.

С использованием математического аппарата [1,2] доказана глобальная разрешимость задачи (1) с коэффициентом массообмена общего вида и доказана разрешимость задачи граничного управления. При конкретных коэффициентах массообмена $\alpha_1 = |\varphi|$ и $\alpha_2 = \varphi^2$ получены оценки локальной устойчивости решений экстремальных задач относительно малых возмущений как функционалов качества, так и заданных функций задачи (1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00365-а) и Российского научного фонда (код проекта 14-11-00079).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г. В., Бризицкий Р. В., Сарицкая Ж. Ю. *Оценки устойчивости решений экстремальных задач для нелинейного уравнения конвекции–диффузии–реакции*. Сиб. ЖИМ. 2016. Т. 19. № 2. С. 3–16.
2. Бризицкий Р. В., Сарицкая Ж. Ю. *Оценки устойчивости решений экстремальных задач для нелинейного уравнения конвекции–диффузии–реакции*. ЖВМ. 2016. Т. 56. № 12. С. 60–71.

ПРЯМОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ПРОФИЛЯ МАССОВОЙ СКОРОСТИ

Н. П. Сатонкина^{1,2}, А. П. Ершов^{1,2}, А. С. Юношев^{1,2}, А. В. Пластинин¹

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

²Новосибирский государственный университет

Электропроводность является чувствительным инструментом исследования детонации. Ранее было получено распределение электропроводности для широкого спектра веществ и плотностей. Профиль электропроводности при детонации конденсированных ВВ сбалансированного состава имеет ярко выраженную неоднородную структуру: рост до максимального значения за несколько десятков наносекунд, узкий пик, быстрый спад, умеренное значение в волне Тейлора в несколько раз меньше максимального. Длительность области высокой электропроводности близка длительности зоны реакции Δt [1, 2]. Литературные данные по Δt получены для зарядов диаметром 40 мм и больше. А электрические характеристики изучались в зарядах диаметром 8 мм. Как известно, длительность зоны реакции растет при увеличении размера заряда. Для соотнесения реперных точек распределений электропроводности и массовой скорости необходимо прямое сопоставление данных.

Проведено прямое сравнение профиля электропроводности и распределения массовой скорости в максимально близких условиях. Показано, что максимум электропроводности находится внутри зоны реакции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-03-01039).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Иванов Г. М. *Распределение электропроводности при детонации прессованного взрывчатого вещества*. Письма в ЖТФ. 2004. № 24. С. 63–69.
2. Ершов А. П., Сатонкина Н. П., Иванов Г. М. *Профили электропроводности в плотных взрывчатых веществах*. Химическая физика. 2007. Т. 26. № 12. С. 21–33.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ

А. В. Свиридов, В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

В литейном производстве отливки, полученные в неразъемных электрофоретических высокоогнеупорных негазотворных оболочковых формах (ОФ) по выплавляемым моделям (ВМ), имеют повышенный брак, связанный с низкой деформационной устойчивостью и трещиностойкостью ОФ на различных технологических этапах их формообразования и получения отливок.

Трещиностойкость ОФ по ВМ зависит главным образом, от их напряженно-деформируемого состояния (НДС) на различных этапах формообразования. Снижение НДС значительно повышает их трещиностойкость и снижает брак отливок по засорам и поверхностным дефектам. Кроме того, известные методы снижения НДС остаются малоизученными. Таким образом, актуальными направлениями исследования является определение НДС на каждом этапе формообразования ОФ и разработка путей его снижения. На основе уравнений механики сплошных сред и уравнения теплопроводности была построена математическая модель процесса затвердевания металла после его заливки в ОФ.

Реализация предложенной системы уравнений осуществляется численным методом, разработанным профессором Одинокоевым В.И. [1]. Суть метода состоит в разбиении исследуемой области на криволинейные элементы ортогональной формы, составлении исходной системы дифференциальных уравнений по элементу в разностном виде через значения напряжений и перемещение (скоростей перемещений) по граням элемента, численного решения построенной алгебраической системы уравнений с учетом начальных и граничных условий по разработанной программе [2]. Для решения уравнений теплопроводности использовали разностную схему и алгоритм решения, описанный в работе [1]. На основе уравнений механики сплошных сред и уравнения теплопроводности при использовании численного метода построена математическая модель НДС оболочковой формы, позволяющая рассчитать температурные поля в оболочковой форме и затвердевающей отливки, толщину затвердевающего слоя отливки, напряжения, деформации и перемещения слоев оболочки относительно друг друга, а также ферростатическое давление металла на форму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинокоев В. И., Каплунов Б. Г., Песков А. В., Баков А. А. *Математическое моделирование сложных технологических процессов*. М.: Наука, 2008.
2. Одинокоев В. И., Прокудин А. Н., Сергеева А. М., Севастьянов Г. М. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661389 "Одиссей"*. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.

ЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА ОБ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В НЕКЛАССИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

Е. В. Семенко, Т. И. Семенко

*Новосибирский государственный технический университет
Новосибирский государственный педагогический университет*

Рассматривается задача об ударной волне, т. е. о разрывном решении уравнений Эйлера движения жидкости/газа. Если уравнение состояния удовлетворяет условию: при фиксированной энтропии $\partial^2 V / \partial p^2 > 0$, где V — удельный объем, p — давление, то (теорема Цемплена, см. например [1]) при переходе через ударную волну энтропия, давление и плотность возрастают, т.е. возможна только волна сжатия, при этом течение перед волной будет сверхзвуковым, а за волной — дозвуковым, что, в свою очередь, обеспечивает корректность задачи Коши. Это — классический случай.

Неклассическим случаем мы называем ситуацию, когда нарушается условие теоремы Цемплена. Стандартный пример дает газ Ван-дер-Ваальса в окрестности так называемой спинодальной зоны. В частности, к подобной задаче приводит моделирование фазовых переходов для газа Ван-дер-Ваальса. В этих случаях возможны уже как волны сжатия, так и разрежения, а течение и перед и за фронтом может быть дозвуковым, что приводит к некорректности (недоопределенности) задачи Коши.

Подобно работе [2], в качестве дополнительного условия, обеспечивающего корректность задачи, принимается изэнтропичность решения. Показано существование кусочно постоянных изэнтропических течений, поставлена линейная (линеаризованная на кусочно постоянном решении) задача Коши, показана ее корректность, в плоскости преобразования Фурье найдено решение этой линейной задачи в замкнутой форме, т.е. в виде чисто алгебраических (и не слишком сложных) формул, выражающих решение через начальные данные и параметры основного (кусочно постоянного) течения. По ходу вывода исследована устойчивость линейной задачи и подтвержден результат [2] — в рассматриваемом случае возможна только так называемая нейтральная устойчивость (другие варианты названия — слабая устойчивость, неустойчивость по Дьякову – Конторовичу).

Полученные формулы для решения линейной задачи позволяют как исследовать его качественные свойства, так и производить численные расчеты. Так, совершенно естественным образом решение разбивается на сумму звуковых и вихревых волн, а также на сумму начальных (непосредственно вызванных начальными возмущениями), преломленных (прошедших через фронт) и отраженных (от фронта) волн. Детально исследована картина падения (на фронт)/преломления/отражения, в частности, обнаружены принципиальные отличия от картины преломления/отражения в классическом случае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика, том. VI, Гидродинамика*. М.: Наука, 1986.
2. Benzoni-Gavage S. *Stability of multi-dimensional phase transitions in a van der Waals fluid*. Nonlinear Analysis, Theory, Methods & Applications. 1998. V. 31. No. 1/2. Pp. 243–263.

ПОСТРОЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ В ЗАДАЧЕ О РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНКИ, ОСЛАБЛЕННОЙ ОТВЕРСТИЯМИ

С. И. Сенашов, О. В. Гомонова

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика
М. Ф. Решетнева, Красноярск

В работе описана методика нахождения упругопластической границы в задаче о растяжении пластинки конечного размера, ослабленной двумя отверстиями, в условиях плоского напряженного состояния. Для решения задачи используется техника законов сохранения ([1] и цитируемая там литература).

Для построения границы необходимо решить упругопластическую задачу для области, ограниченной контуром Γ , состоящим из внешнего контура Γ_1 и двух внутренних — Γ_2 и Γ_3 . Контур Γ находится в пластическом состоянии.

На Γ ставятся следующие граничные условия:

$$\sigma_x n_1 + \tau n_2 = X, \quad \sigma_y n_2 + \tau n_1 = Y, \quad \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2 = 3k^2, \quad (1)$$

где $\vec{n} = (n_1, n_2)$ — нормальный вектор к контуру Γ .

Решение поставленной задачи состоит из трех этапов. Первый заключается в решении уравнения Лапласа $\Delta F = 0$ с граничными условиями $F|_{\Gamma} = \sigma_x + \sigma_y$, где σ_x, σ_y — функции из условий (1). Второй этап состоит в нахождении функций σ_x, σ_y, τ в каждой точке (x_0, y_0) области, ограниченной контуром Γ , с помощью формул, полученных из законов сохранения:

$$2\pi\sigma_x(x_0, y_0) = \int_{\Gamma_1+\Gamma_2+\Gamma_3} (\omega_1^1\sigma_x + \omega_1^2\tau + f_1)dy - (\omega_1^2\sigma_x + \omega_1^1\tau + g_1)dx,$$

$$2\pi\tau(x_0, y_0) = \int_{\Gamma_1+\Gamma_2+\Gamma_3} (\omega_2^1\sigma_x + \omega_2^2\tau + f_2)dy - (\omega_2^2\sigma_x + \omega_2^1\tau + g_2)dx,$$

$$\sigma_y(x_0, y_0) = F - \sigma_x(x_0, y_0),$$

где

$$\omega_1^1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad \omega_1^2 = -\frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad \omega_2^1 = \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$$\omega_2^2 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad f_1 = 0, \quad f_2 = 0, \quad g_1 = \int \omega_1^2 d_y F, \quad g_2 = \int \omega_2^2 d_y F.$$

На третьем этапе проверяется условие пластичности $\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2 = 3k^2$ в каждой внутренней точке области, ограниченной контуром Γ , и строится упругопластическая граница.

ЛИТЕРАТУРА

1. Senashov S. I., Filyushina E. V., Gomonova O. V. *Construction of Elasto-Plastic Boundaries Using Conservation Laws*. Vestnik SibGAU. 2015. V. 16, № 2. Pp. 343–359.

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ПЛАСТИЧНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ

С. И. Сенашов, А. В. Кондрин, И. Л. Савостьянова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика
М. Ф. Решетнева, Красноярск

После работы Э. Нетер законы сохранения стали строиться и для дифференциальных уравнений. Часто эти законы никак не использовались. Поэтому одним из авторов доклада была сформулирована проблема: “Использовать законы сохранения для решения краевых задач”. К этому времени уже были описаны все локальные законы сохранения уравнений плоской пластичности [1], но применения им не было найдено. Наконец в [2] было показано, как с помощью этих законов сохранения можно решать задачу Коши для уравнений идеальной пластичности. Более подробно это изложено в [3], там же решена и задача Римана. В [4–6] было показано, что законы сохранения позволяют строить упруго – пластическую границу для скручиваемых призматических стержней, а также изгибаемых консолей. При этом поперечное сечение ограничено кусочно – гладким контуром с отверстиями произвольной формы. Для этих задач созданы программные продукты, позволяющие вычислять упруго – пластические границы для стержней прокатной формы. В настоящем докладе рассказывается о решении задачи о построении упруго – пластической границы для плоской области, ограниченной кусочно – гладкой границей и имеющей несколько отверстий произвольной формы. Создается программная реализация для решения этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Senashov S. I., Vinogradov A. M. *Symmetries and conservation laws of 2- dimensional ideal plasticity*. Proc. Edinburg Math. Soc. 1988. V. 3. Pp. 415–439.
2. Сенашов С. И. *Законы сохранения и точное решение задачи Коши для уравнений идеальной пластичности*. Доклады РАН. 1995. Т. 334, № 5. С. 619–620.
3. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. *Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений*. Красноярск: Издательство СО РАН, 2001.
4. Senashov S. I., Yakhno A. *Conservation Laws of Three-Dimensional Perfect Plasticity Equations under von Mises Yield Criterion*. Abstract and Applied Analysis. Volume 2013. Article ID 702132, 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/702132>
5. Senashov S. I., Kondrin A. V., Cherepanova Olga N. *Elastoplastic Bending of Beam*. J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics. 2014. № 7(2). Pp. 203–208.
6. Senashov S. I., Kondrin A. V., Cherepanova Olga N. *On Elastoplastic Torsion of a Rod with Multiply Connected Cross-Section*. J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics. 2015. № 7(1). Pp. 343–351.

ОБ УПРАВЛЕНИИ ПОДЪЕМНОЙ СИЛОЙ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

В. Л. Сенницкий

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

Теоретическими исследованиями силового взаимодействия и совместного движения вязкой жидкости и контактирующих с ней твердых тел (включений, стенок) определяется одна из неизменно актуальных областей механики жидкости (см., например, [1–3]). В частности, представляет существенный интерес вопрос о возможностях управления силовым взаимодействием жидкости и твердых тел.

В данной работе для малых значений числа Рейнольдса — в приближении, более высоком, чем приближение Стокса — найдено решение плоской задачи о силовом взаимодействии вращающегося твердого кругового цилиндра и обтекающей его вязкой несжимаемой жидкости. Гидромеханическая система подвергается внешним воздействиям, проявляющимся в том, что скорость движения жидкости на вспомогательной внешней цилиндрической границе и угловая скорость вращения цилиндра заданным образом периодически изменяются со временем. Постановку задачи составляют формула для силы, действующей со стороны жидкости на часть цилиндра конечной длины, уравнения Навье–Стокса и неразрывности и условия на границе цилиндра и внешней границе занимаемой жидкостью области. Найдено, что средняя по времени подъемная сила может изменяться вследствие испытываемых гидромеханической системой воздействий, характеризующихся управляющими параметрами — коэффициентами Фурье скорости движения жидкости на внешней границе и угловой скорости вращения цилиндра. Установлено, что при стремлении радиуса внешней границы к бесконечности средняя подъемная сила имеет конечный предел.

Результаты данной работы могут быть использованы, в частности, при математическом моделировании перспективных методов управления силовым взаимодействием жидкости и твердых тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенницкий В. Л. *О силовом взаимодействии шара и вязкой жидкости в присутствии стенки*. ПМТФ. 2000. Т. 41. № 1. С. 57–62.
2. Сенницкий В. Л. *О заданной ориентации твердого включения в вязкой жидкости*. Сибирский журнал индустриальной математики. 2015. Т. 18. № 1. С. 123–128.
3. Сенницкий В. Л. *Движение вязкой жидкости и стенки в присутствии покоящейся стенки*. ПМТФ. 2016. Т. 57. № 2. С. 76–82.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕЙ ЭРОЗИИ ГРУНТА

А. Н. Сибин

Алтайский государственный университет, Барнаул

В работе рассматривается математическая модель изотермической внутренней эрозии без учета деформации пористой среды. При достижении определенной величины скорости фильтрации происходит вынос частиц грунта из области течения. В качестве математической модели используются уравнения сохранения массы для воды, подвижных твердых частиц и неподвижного пористого скелета, а также закон Дарси для воды и подвижных твердых частиц и эмпирическое соотношение для интенсивности суффозионного потока [1, 2].

В докладе излагаются результаты численного решения модельной задачи и тестирование модели на экспериментальных данных, представленных в работе [3]. Численное решение начально-краевой задачи при заданной суммарной скорости фильтрации проведено в работе [4]. В данной работе предложен алгоритм решения общей задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00291).

ЛИТЕРАТУРА

1. Vardoulakis I., Stavropoulou M., Papanastasiou R. *Hydro-Mechanical Aspects of the Sand Production Problem*. Transport in Porous Media. 1996. V. 22. Pp. 225–244.
2. Einstein H. A. *Der Geschiebetrieb als wahrscheinlichkeits Problem*. Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Eidg. T. H., Zurich, 1937.
3. Chetti A., Benamar A., Hazzab A. *Modeling of Particle Migration in Porous Media: Application to Soil Suffusion*. Transport in Porous Media. 2016. V. 113(3). Pp. 591–606.
4. Papin A. A., Sibin A. N. *Model isothermal internal erosion of soil*. J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 722(1). Pp. 1–8.

ГЕНЕРАЦИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЯХ И ПРОБИТЫХ ПРЕГРАДАХ

В. Г. Смеликов

АО “НПО “Базальт”, Москва

Известная более 90 лет металлофизическая “культура” по Я. И. Френкелю [1] не дает права современным исследователям пренебрегать вкладом электронной подсистемы ударнонагруженного материала в изменение его термодинамических характеристик P , V и T [2]. Этот вклад подчеркивает значение адекватной физики отрицательных давлений для случая большой нелинейности связи давления и объема под влиянием термобарического действия взрыва, когда приращение давления dP отстает или опережает приращение объема dV . В результате синергизма баротермического действия взрыва материал разных частей КС (за “время ее жизни” ~ 1 мс) успевает побывать в предплавленном, трансплавленном и сверхплавленном,

т.е. перегретом твердотельном состоянии, в наших терминах в "трех-с-половинном состоянии" из-за конкуренции скоротечной (до ~ 300 нс) термобарической ионизации КС и еще более скоротечной (до ~ 10 нс) инерционной атомизации песта. Процесс термобарической диссоциации меди, скоротечность которого оценивается пикосекундным диапазоном (10^{-12} с), успевает завершиться в пределах толщины ударного фронта. Иллюстрируется начало процесса шейкикообразования в КС, "молотковый эффект" в КС, которая стучит с плазменной частотой, соответствующей длинам волн $\sim 5...25$ мм, а также "кондукторный эффект" в разнесенной преграде [2–5].

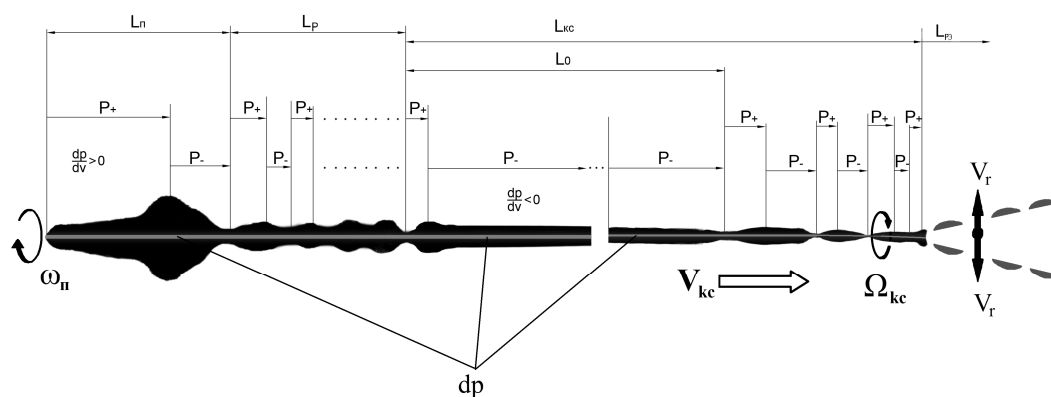


Рис. Упруго-пластические волны в песе и в КС (собираемый результат обработки большого числа рентгенограмм КС ПГ), где $L_{п}$ — длина песта, $L_{р}$ — зона разгона КС, $L_{кс}$ — длина КС, L_0 — длина КС до разделения на элементы, $P-$ — отрицательное давление, $P+$ — положительное давление, dP/dV — производная давления P по объему V , где dP — приращение давления, dV — приращение объема, dp — несплошность материала в песе, КС и элементах, $L_{рэ}$ — зона долевого разделения элементов из-за доминанты инерционных сил над силами прочности твердотельных элементов КС

Как это ни парадоксально звучит, физика и механика "несплошной" среды (где взять сплошную, если применять материалы промышленной чистоты?), а также атомноионная кинетика деформаций с ее дислокационными механизмами больших пластических деформаций материалов, позволила повысить "культуру веса" до пробиваемости > 1 мм брони на 1 г ВВ в зарядах гранат. При этом промышленная чистота мономорфной меди М1 никогда не превышала трех девяток - 99,9% Cu. С повышением металлофизической культуры при разработке и производстве КЗ, а также с увеличением производительности компьютеров, будет сокращаться дистанция между уравнениями Шредингера, Навье-Стокса ... и "кузнечным цехом" в виде трехмерного очага деформаций в песе, из которого "вывинчивается" КС, обремененная градиентами скоростей, вихрями и антивихрями типа "КС-пест", лапласианами и другими операторами, а также "молотковыми и кондукторными" эффектами [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Френкель Я. И. *Введение в теорию металлов*. Гос. изд-во технико-теоретич. литературы, Москва - 1950 - Ленинград.
2. Смеликов В. Г. *Устойчивость ограниченной кумуляции*. М.: Студия "Этника". 2016. 125 с: ил.
3. Титов В. М. *Лаврентьев М. А. и его школа*. Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. №6. С. 3-13.

4. Бриджмен П. *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. Изд. иностранной литературы. М.: 1955. 444с.
5. Кругляков Э.П. *Ученые с большой дороги*. М.: Наука. 2002. 320 с.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ МЕТОДОМ ПОДВИЖНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

А. Ю. Смолин¹, И. Ю. Смолин², Г. М. Еремина¹, И. Ю. Смолина³

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

²*Томский государственный университет*

³*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Метод подвижных клеточных автоматов (ПКА) является эффективным дискретным методом вычислительной механики, в котором предполагается, что материал состоит из набора элементарных объектов, силы между которыми определяются в соответствии с правилами многочастичного взаимодействия. В данной работе метод ПКА развит для многоуровневого моделирования керамики с учётом структуры её пористого пространства.

Начальным уровнем в описании рассматриваемого материала является масштаб самых мелких пор. В расчётах на этом уровне они учитываются явно. Генерируются образцы разного размера с различным распределением пор по объёму. По результатам расчетов для каждого образца определяются модуль сжатия и предел прочности. Затем для каждого размера находится среднее значение по образцам с различным вариантом распределения пор по объёму. Анализируется сходимости средних значений модуля сжатия и предела прочности при увеличении размера соответствующих образцов и таким образом определяется размер представительного образца. По модулям сжатия и пределам текучести представительных образцов вычисляются параметры функции отклика автоматов данного уровня, в том числе параметры распределения Вейбулла, описывающего случайный разброс прочностных и упругих свойств представительных образцов с индивидуальным расположением пор. Эти параметры позволяют переходить к расчетам следующего уровня, где, например, из автоматов предыдущего уровня состоят стенки макропор, а сами макропоры учитываются явно. Если всего масштабных уровней n , то для описания материала на макроуровне необходимо проводить $n - 1$ расчетов с переносом параметров с предыдущего уровня на текущий.

Возможности предложенного подхода продемонстрированы на примере моделирования керамики диоксида циркония с двумя характерными размерами пор. Показано, что на конечном макроскопическом уровне результаты моделирования позволяют описывать характерные упругие и прочностные свойства керамики и особенности её разрушения.

Работа выполнена в рамках проекта 23.2.3 Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (ПФНИ ГАН) на 2013-2020 годы.

О ДВИЖЕНИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ МАРАНГОНИ

Н. Л. Собачкина

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Рассматривается движение бинарной смеси. Обозначим через \mathbf{u} , p — соответственно вектор скорости и давление, θ и c — отклонения от средних значений температуры и концентрации. Тогда система уравнений термодиффузионного движения (в отсутствии внешних сил) имеет вид [1]:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \nu \Delta \mathbf{u}, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad \frac{d\theta}{dt} = \chi \Delta \theta, \quad \frac{dc}{dt} = d \Delta c + \alpha d \Delta \theta, \quad (1)$$

где ρ — средняя плотность, ν — кинематическая вязкость, χ — температуропроводность, d — коэффициент диффузии, α — коэффициент термодиффузии (коэффициент Co_{re}); $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$.

После обезразмеривания и перехода в неинерциальную систему координат, получим задачу:

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + \operatorname{Ma} \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p = \Delta \mathbf{u}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{Pr} \left(\partial \theta / \partial t + \operatorname{Ma} \mathbf{u} \cdot \nabla \theta \right) = \Delta \theta, \quad (4)$$

$$\operatorname{Sc} \left(\partial c / \partial t + \operatorname{Ma} \mathbf{u} \cdot \nabla c \right) = \Delta c - \varepsilon \Delta c, \quad (5)$$

где $\operatorname{Ma} = \varkappa_1 A h_0^2 / \mu \nu$ — тепловое число Марангони, $\operatorname{Pr} = \nu / \chi$ — число Прандтля, $\operatorname{Sc} = \nu / d$ — число Шмидта, $\varepsilon = -\alpha \beta_2 / \beta_1$ — параметр термодиффузии; A — градиент температуры, \varkappa_1 — некоторая постоянная. Будем считать, что число Марангони мало, тогда в уравнениях импульса, переноса тепла и концентрации можно выбросить конвективные члены.

Задача сводится к начально-краевой задаче для параболических уравнений [2]. Найдено стационарное решение задачи и доказано, что оно является предельным при $t \rightarrow \infty$ при различных заданных перепадах давления в смеси. В изображениях по Лапласу получено точное аналитическое решение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00067).

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. К., Гапоненко Ю. А. *Математическое моделирование конвективных течений. Учебное пособие*. Красноярск: КрасГУ, 2006. 392 с.
2. Андреев В. К., Собачкина Н. Л. *Свойства решений начально-краевой задачи, возникающей при движении бинарной смеси в цилиндрической трубе*. Препринт № 1. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2009. 40 с.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ МАСКИРОВКИ ОТНОСИТЕЛЬНО СТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Ю. Э. Спивак

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию задач управления физическими полями, например, электромагнитными и акустическими, с целью маскировки материальных тел. Для решения указанных задач широко применяется метод оптических преобразований (МОП), предложенный в [1]. Относительно недавно МОП был распространен и на случай статических полей [2, 3], что позволило исследователям успешно решать задачи дизайна устройств невидимости в случае статических (тепловых, магнитных и электрических) полей. Важно отметить, что техническая реализация указанных решений весьма затруднена из-за отсутствия в природе соответствующих маскировочных материалов, отвечающих найденным решениям. Существует несколько способов преодоления трудностей с технической реализацией решений, среди которых отметим оптимизационный метод [4–6].

В настоящей работе исследуется 2D задача маскировки относительно статического, в частности теплового, поля с использованием маскировочной оболочки Ω , заполненной неоднородной анизотропной, в общем случае, средой. Предполагается, что теплопроводные свойства маскировочной оболочки описываются тензором теплопроводности k , тогда как внутренняя и внешняя области заполнены одной и той же однородной изотропной средой с постоянным коэффициентом теплопроводности k_0 . Для решения поставленной задачи применяется оптимизационный подход [5, 6], с помощью которого обратная задача сводится к задаче минимизации определенного функционала качества, адекватно отвечающего исходной задаче маскировки. Разрабатывается численный алгоритм решения рассматриваемой задачи маскировки, обсуждаются и анализируются результаты вычислительных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-01-00365-а) и программы фундаментальных исследований ДВО РАН “Дальний Восток” (проект 15-1-4-036).

ЛИТЕРАТУРА

1. Pendry J. B., Shurig D., Smith D. R. *Controlling electromagnetic fields*. Science. 2006. V. 312. № 1. Pp. 1780–1782.
2. Lan C., Li B., Zhou J. *Simultaneously concentrated electric and thermal fields using fan-shaped structure*. Optics express. 2015. V. 23. № 024475.
3. Sanchez A., Navau C., Prat-Camps J., Chen D. X. *Antimagnets: controlling magnetic fields with superconductor/metamaterial hybrids*. New J. Phys. 2011. V. 13. № 093034.
4. Alekseev G. V. *Analysis and optimization in problems of cloaking of material bodies for the Maxwell equations*. Differential Equations. 2016. V. 52, Pp. 361–372.
5. Alekseev G. V., Spivak Yu. E. *Analysis of the 3D acoustic cloaking problems using optimization method*. J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 722. №. 012002.
6. Алексеев Г. В. *Проблема невидимости в акустике, оптике и теплопереносе*. Владивосток: Дальнаука, 2016.

ТЕПЛОВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В ВЫСОКОТЕМПОВОМ МНОГОРЕЛЬСОВОМ УСКОРИТЕЛЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПИТАНИЕМ ОТ ИМПУЛЬСНОГО МГД-ГЕНЕРАТОРА

С. В. Станкевич¹, Г. А. Швецов¹, В. Г. Бутов², С. В. Синяев²

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

²Институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск

Достижение скоростей метания выше $2,0 \div 3$ км/с в электромагнитных рельсовых ускорителях с высоким темпом метания твердых тел, даже для тел с относительно небольшими массами ($100 \div 1000$ г), требует использования источников питания с запасом энергии в десятки и сотни мегоджоулей. Использование в качестве источников питания конденсаторных батарей, из-за их энергетических и массо-габаритных характеристик, практически исключает создание на их основе мобильных источников. Одними из альтернативных источников энергии конденсаторным источникам питания являются импульсные МГД генераторы на ракетном топливе. Эти генераторы компактны, автономны и имеют удельные энергетические характеристики во много раз превышающие удельные энергетические характеристики конденсаторов. Анализ работы импульсного МГД-генератора на многорельсовый электромагнитный ускоритель твердых тел показал перспективность использования мощных импульсных МГД-генераторов в качестве источника питания импульсных высокотемповых ускорителей твердых тел, однако, ряд вопросов требует дальнейшего изучения. В частности, возникает вопрос, насколько существенны в таких ускорителях тепловые ограничения скорости при последовательном ускорении в них нескольких тел.

В докладе на основе численного моделирования, выполненного в объединенной 2D и 3D нестационарной постановке, проведен анализ тепловых ограничений в многорельсовых электромагнитных ускорителях твердых тел при последовательном ускорении в них нескольких тел с высоким темпом метания. В расчетах в качестве источника питания ускорителей используется импульсный МГД генератор типа "Сахалин". Рассмотрены ускорители с тремя и пятью парами параллельно расположенных рельсов, соединенных в последовательную электрическую цепь. Проведено моделирование последовательного ускорения различного количества тел и для различных масс ускоряемых тел. Установлено, что одним из основных ограничений работы ускорителей в таких режимах работы является нагрев рельсов. Существенной особенностью, определяющей скорость нагрева рельсов, является неоднородность распределения плотности тока по сечению рельсов, обусловленная нестационарной диффузией магнитного поля в рельсы и скоростным скин-эффектом. В результате расчетов, с учетом нестационарного характера распределения токов в рельсах многорельсового ускорителя, установлено, что при соответствующем выборе массы ускоряемых тел, их количества в очереди и материала рельсов возможно при умеренном нагреве рельсов достижение скоростей метания выше $2,0 \div 2,5$ км/с при массах ускоряемых тел до 1000 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАОТИЧНОЙ ДИНАМИКИ ПОЛИМЕРНОЙ МОЛЕКУЛЫ В ЖИДКОМ РАСТВОРЕ С ПРИЛОЖЕНИЕМ К РАЗРАБОТКЕ НАНОСЕНСОРА

В. Н. Старовойтов^{1,2}, Б. Н. Старовойтова¹

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

²*Новосибирский государственный университет*

В работе исследуется движение полимерной молекулы в жидком растворе. Молекула представляет собой длинную цепочку групп атомов, которая движется под действием ударов молекул жидкости. В силу хаотичности процесса необходимо использовать вероятностный подход. Все величины описываются не точно, а с помощью распределения плотности вероятности. Нас интересует расстояние между концами цепочки. Для описания плотности вероятности этой величины мы выписываем слабо нелинейное параболическое уравнение с нелокальным операторным коэффициентом при младшем члене. Особенностью этого коэффициента является то, что в нем производится интегрирование некоторой функции от решения по всему промежутку времени решения задачи. Фактически, чтобы найти решение в какой-то момент, необходимо знать его на всем промежутке времени, то есть знать и “будущее”. Дело в том, что роль времени здесь играет параметр длины дуги вдоль цепочки, а на состояние каждого звена влияют все звенья цепочки. Такой тип уравнений является новым в теории параболических уравнений.

Предложенная модель была применена к моделированию биологического наносенсора, основанного на свойстве энтропийной упругости полимерной молекулы. Этот сенсор служит для обнаружения в растворе протеина, на который он настроен.

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ МАКСВЕЛЛА СЛОИСТОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Б. Н. Старовойтова¹, В. Н. Старовойтов^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет*

Рассматривается одномерно-периодическая слоистая структура, состоящая из упругого материала и жидкости Максвелла. Жидкость Максвелла относится к классу вязко-упругих жидкостей, уравнение состояния которых заключается в том, что тензор скоростей деформации пропорционален сумме тензора напряжений и его производной по времени. Для описания механической системы используются уравнения линейной теории упругости и линеаризованные уравнения динамики жидкости Максвелла. Предполагается, что толщина слоев мала по сравнению с размерами области, в которой решается задача.

Проведено усреднение описанной механической системы при стремлении периода структуры к нулю, при этом использовался метод двушкальной сходимости Нгуеценга. Рассмотрены усреднения для нескольких типов жидкости Максвелла: стандартная, с малой вязкостью, с малым параметром Максвелла. В каждом случае получена своя усредненная система уравнений. Изучены акустические свойства полученных усредненных систем, то есть их решения типа бегущих волн.

Данное исследование является продолжением работы [1]. Аналогичное исследование было проведено в [2], где вместо жидкости Максвелла фигурировала просто вязкая жидкость. Полученные результаты могут быть использованы в сейсморазведке при разработке нефтяных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старовойтов В. Н., Старовойтова Б. Н. *Усредненная математическая модель периодической упругой структуры, насыщенной жидкостью Максвелла*. Тезисы докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 95-летию академика Л. В. Овсянникова “Новые математические модели в механике сплошных сред: построение и изучение”, Новосибирск, 18-22 апреля 2014. С. 132.
2. Shelukhin V. V., Isakov A. E. *Elastic waves in layered media: Two-scale homogenization approach*. European Journal of Applied Mathematics. 2012. V. 23. Pp. 691–707.

О СИММЕТРИЯХ И ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

И. В. Степанова

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Работа посвящена исследованию уравнений теплопереноса в бинарных смесях со сложными физическими свойствами посредством метода симметрий Ли-Овсянникова. Кроме процессов теплопроводности и диффузии уравнения модели учитывают перекрестные эффекты Сорэ и Дюфора и имеют вид

$$\theta_t = \operatorname{div}(\chi \nabla \theta + D^\delta \nabla c), \quad c_t = \operatorname{div}(D \nabla c + D^\theta \nabla \theta), \quad (1)$$

здесь неизвестные функции θ и c — температура и концентрация легкой компоненты, χ , D , D^θ и D^δ — коэффициенты теплопроводности и диффузии, а также коэффициенты, отвечающие за эффекты Сорэ и Дюфора соответственно. В общем случае все коэффициенты переноса являются функциями температуры и концентрации.

Следует отметить, что о необходимости учета эффектов Сорэ (термическая диффузия) и Дюфора (диффузионная теплопроводность) при моделировании процессов в бинарных смесях ведется многолетняя дискуссия. Действительно, если процесс происходит при достаточно малых разностях температур и/или концентраций, тогда можно полагать $D^\theta = D^\delta \equiv 0$ в уравнениях (1). Для более точного моделирования теплопереноса в жидкостях и газах влиянием этих эффектов, а также зависимостью всех коэффициентов переноса от параметров состояния не следует пренебрегать (см., например, [1, 2]).

В представленной работе показано, что основная группа преобразований двумерной системы (1) состоит из переносов по времени и пространственным координатам, одновременного растяжения независимых переменных и преобразования вращения. Установлено, что в случаях, когда один из эффектов (Сорэ или Дюфора) не учитывается, задача групповой классификации значительно упрощается. Результат ее решения приводится в виде таблиц, где перечисляются полученные зависимости классифицируемых коэффициентов, а также дифференциальные операторы, расширяющие основную алгебру.

В случае произвольных систем вида (1) с произвольным числом неизвестных функций и пространственных переменных доказано, что для любых точечных (не только инфинитезимальных) преобразований, преобразования переменной t зависят только от времени, а преобразования пространственных координат – только от t и \mathbf{x} .

Построены некоторые точные решения системы (1) для описания теплообмена в смесях с физическими параметрами, зависящими от температуры и концентрации, показано отличие полученных решений от решений аналогичных систем, где коэффициенты переноса считаются постоянными.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-4519.2016.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Platten J. K. *The Soret effect: a review of recent experimental results*. J.Appl.Mech. 2006. V. 73. Pp. 5–15.
2. Rastogi R. P. *Dufor effect in liquid mixtures*. J.Chem.Phys. 1969. V. 51. Pp. 2826–2830.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В ПОЛНОМ АСИМПТОТИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ М. УИЛЬЯМСА

Л. В. Степанова

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

Работа посвящена многопараметрическому асимптотическому описанию поля напряжений у вершин двух коллинеарных трещин различной длины в бесконечной линейно упругой изотропной пластине, находящейся под действием 1) нормального растягивающего напряжения; 2) поперечного сдвига и в условиях 3) смешанного деформирования в полном диапазоне смешанных форм нагружения. Построены многопараметрические асимптотические разложения компонент тензора напряжений, содержащие высшие приближения, в которых аналитически определены все масштабные множители – коэффициенты полного асимптотического разложения М. Уильямса – как функции длин трещин, расстояния между ними и параметров нагружения. С помощью построенного разложения и полученных формул для коэффициентов разложения можно удерживать любое, наперед заданное число слагаемых в асимптотических представлениях механических полей у вершины трещин в пластине. Выполнен асимптотический анализ влияния высших приближений в асимптотическом разложении поля напряжений у вершин трещин в бесконечной линейно упругой изотропной пластине, ослабленной двумя коллинеарными трещинами разной длины для различных значений геометрических параметров (длин трещин и расстояния между ними). Показано [1, 2], что высшие приближения в асимптотическом разложении играют существенную роль при оценке поля напряжений при увеличении расстояния от кончика трещины: чем больше слагаемых удерживается в асимптотическом разложении, тем больше область действия асимптотики М. Уильямса. Вычислены

углы распространения трещины в условиях смешанного нагружения с помощью многопараметрического разложения поля напряжений посредством 1) критерия максимального тангенциального напряжения; 2) критерия минимума плотности энергии упругой деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00571).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stepanova L. V., Roslyakov P.S. *Multi-parameter description of the crack-tip stress field: Analytic determination of coefficients of crack-tip stress expansions in the vicinity of the crack tips of two finite cracks in an infinite plane medium*. International Journal of Solids and Structures. 2016. №100-101. Pp. 11–28.
2. Stepanova L.V., Igonin S.A. *Asymptotics of the near-crack-tip stress field of a growing fatigue crack in damage materials: Numerical experiment and analytical solution*. Numerical Analysis and Applications. 2015. V. 8. № 2. Pp. 168–181.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ КАМЕРЫ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ

О. И. Стояновский, Б. С. Злобин, А. А. Штерцер, Ю. П. Мещеряков

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Проектирование взрывных камер (ВК) базируется на исследованиях напряженно-деформированного состояния корпуса, в частности показывающих, что наиболее нагруженными элементами оказываются днища, а определяющие ресурс ВК максимальные напряжения достигаются в их полюсах [1-4]. Простым и экономичным способом усиления днищ, является увеличение их толщины в области полюса с помощью свариваемых вставок. Согласно численным расчетам, существует оптимальное значение радиуса вставки, при котором снижение напряжений в полюсе происходит практически пропорционально соотношению толщин вставки и оболочки [3]. Определение напряжений в окрестности таких элементов конструкции, как окна, люки, вводы клапанов и др., проводится тензометрированием с наклейкой двух или трех тензодатчиков в различных направлениях. В большинстве случаев достаточно наклейки двух тензодатчиков, т.к. увеличение их числа уточняет результаты не более чем на 3%. В изготовлении ВК применяются конструктивные решения, позволяющие обеспечивать надежную герметизацию внутреннего объема и предотвращать утечку продуктов детонации в помещение [5]. Области применения ВК включают как научные исследования, так и промышленное производство. Например, камера ДВК-0.2 на 200 г ТНТ успешно используется в исследованиях процесса детонации ВВ с применением синхротронного излучения. Камера КВ-5 на 5 кг ТНТ может применяться как для сварки взрывом, так и для утилизации элементов боеприпасов. Изготовленная в 2016 году камера КВГ-2 на 2 кг ТНТ предназначена для регистрации взрывных процессов методом рентгеноимпульсной съемки одновременно тремя аппаратами Арион-900 при вакуумировании рабочего объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демчук А. Ф., Исаков В. П. *Металлические взрывные камеры*. Красноярск: РИО КрасГУ, 2006.
2. Shtertser A., Stoyanovskii O., Zlobin B., Meshcheryakov Yu., Skornyakov Yu. *Designing and manufacturing of explosion chambers for scientific research and explosive working of materials*. Archives of Metallurgy and Materials. 2014. V. 59. Issue 4. Pp. 1619–1624.
3. Мещеряков Ю. П. *Численное исследование влияния усиливающих элементов в области полюса на прочность несферических оболочек при импульсном нагружении*. ПМТФ. 2017 (принято к публикации).
4. Мещеряков Ю. П., Пикаревский А. А., Стояновский О. И. *О влиянии жесткости амортизирующих прокладок на уровень напряжений в корпусе взрывной камеры*. ПМТФ. 2013. Т. 54, № 4. С. 191–200.
5. Мещеряков А. А., Ермилов Н. П., Злобин Б. С., Мещеряков Ю. П. *Уплотнительный узел развѐма камеры для обработки материалов энергией взрыва*. Заявка на патент РФ № 2016122745. Приоритет от 08.06.2016.

ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ ПОД НЕОДНОРОДНЫМ
ЛЕДЯНЫМ ПОКРОВОМ

И. В. Стурова, Л. А. Ткачева

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

Интенсивное освоение Арктики вызывает интерес к решению новых задач, связанных с взаимодействием различных возмущений в жидкости с ледяным покровом. В настоящее время наиболее полно изучена задача о движении внешней нагрузки по безграничному однородному ледяному покрову. Ледяной покров моделируется тонкой упругой пластиной, плавающей на поверхности воды. Однако в реальных условиях ледяной покров не является однородным, так как может покрывать не всю верхнюю границу жидкости, а только ее часть, а также в нем могут существовать трещины и развѐдья. Влияние таких сложных граничных условий на поведение волнового движения находится в начальной стадии изучения. Ранее в двумерной постановке исследованы волновые движения, возникающие при колебаниях погруженного горизонтального цилиндра в случаях ледяного покрова как конечной, так и полубесконечной ширины, а также развѐдья между двумя полубезграничными ледовыми полями с различными свойствами [1, 2]. Получены аналитические решения трехмерных задач о поведении полубесконечного ледяного покрова, а также бесконечного ледяного покрова с прямолинейной частично сmerzшейся трещиной, под действием локализованной периодической по времени внешней нагрузки [3, 4].

В данной работе представлены решения стационарной задачи о поведении полубесконечного ледяного покрова под действием внешней нагрузки, движущейся вдоль его прямолинейного края. Рассмотрены два случая: 1) вне ледяного покрова поверхность жидкости является свободной, 2) жидкость ограничена твердой вертикальной стенкой и край ледяного покрова, примыкающий к стенке, может быть как защемленным, так и свободным. Задача решается в линейной постановке, жидкость предполагается идеальной и несжимаемой, а ее движение –

потенциальным. Для первого случая сопоставлены результаты, полученные двумя способами: методом Винера–Хопфа и сращиванием разложений по вертикальным собственным функциям. Определены возвышения ледяного покрова и свободной поверхности при различных скоростях движения нагрузки, а также силы, действующие в горизонтальных направлениях на внешнюю нагрузку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sturova I. V. *Radiation of waves by a cylinder submerged in water with ice floe or polynya*. J. Fluid Mech. 2015. V. 784. Pp. 373–395.
2. Ткачева Л. А. *Колебания цилиндрического тела, погруженного в жидкость, при наличии ледяного покрова*. ПМТФ. 2015. Т. 56. №. 6. С. 173–186.
3. Ткачева Л. А. *Колебания ледяного покрова с трещиной при воздействии периодической по времени нагрузки*. Изв. РАН. МЖГ. 2017. №. 2. С. 54–64.
4. Ткачева Л. А. *Краевые волны в жидкости под ледяным покровом с трещиной*. ДАН. 2017. Т. 473 (в печати).

ОБРАЗОВАНИЕ СИЛЬНЫХ РАЗРЫВОВ ГИДРОУПРУГИХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ КАНАЛАХ

С. В. Сухинин

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

В рамках теории длинных волн в каналах с упругими стенками определены критерии образования сильных разрывов (аналогов ударных волн) в однородных, сужающихся и расширяющихся каналах. Приведены примеры образования сильных разрывов для каналов гидроразрыва и газовой полости РДТТ в момент запуска.

Место настоящей работы. Первые и основополагающие исследования распространения гидроупругих волн в трубопроводных системах были проведены Н.Е. Жуковским в конце 19 века, изложение результатов этих работ содержится в [1]. Количество публикаций по этой тематике постоянно увеличивается. Теория распространения волн в трубопроводных системах содержится в [2]. Изложение использования гидроупругих трубных волн в геофизических исследованиях скважин содержится в [3]. Целью настоящей работы является качественное исследование нелинейных явлений возникающих при распространении гидроупругих волн в неоднородных каналах. Нелинейные явления связаны, как правило, с укручением волн и образованием сильных разрывов, начало которых можно описать при помощи градиентных катастроф. В настоящей работе исследования влияния нелинейности и возникновения градиентных катастроф в каналах с упругими стенками проводится при помощи методов теории распространения слабых разрывов [4].

Пусть канал заполнен сплошной средой. Давление и скорость сплошной среды в канале обозначены $p = p(x, t)$ и $u = u(x, t)$ соответственно. Плотность $\rho = \rho(p)$, и площадь поперечного сечения канала $A(p, x)$ считаются известными (заданными) функциями. Распространение возмущений в каналах с упругими стенками описывается при помощи системы уравнений, которая получена прямым вычислением из законов сохранения массы и импульса. Прямым

вычислением можно показать, что местная скорость распространения гидроупругих волн $c_{channel}$ имеет вид $c_{channel} = \sqrt{\frac{A}{(A\rho)_p}}$.

Физические предпосылки образования сильных разрывов. Прямой проверкой можно установить, что $c_{channel}$ всегда меньше скорости звука сплошной среды, заполняющей канал. Малость скорости $c_{channel}$ является важной особенностью распространения волн в каналах с упругими стенками, которая обуславливает появление сильных разрывов даже в каналах с водой.

По результатам работы получен патент [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский Н. Е. *О гидравлическом ударе в водопроводных трубах*. М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
2. Лайтхилл Д. *Волны в жидкостях*. М.: Мир, 1981.
3. White J. E. *Undeground sound*. Elsevier, 1983.
4. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. *Системы квазилинейных уравнений и их приложения в газовой динамике*. М.: Наука, 1978.
5. Сухинин С. В., Рымаренко К. В. *Способ гидроразрыва пласта*. Патент № 2447278 25.12.2012.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛНОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

А. К. Такмазьян, В. В. Прокофьев, Е. В. Филатов, А. Ю. Якимов

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

Представлены результаты исследований эффективности судовых волновых движителей различных типов. Проведено численное моделирование пластины, допускающей ограниченное вращение (качание) около поперечной к плоскости симметрии судна оси. Показано, что появление такой дополнительной степени свободы увеличивает среднюю скорость движения судна против волн по сравнению с пластиной, жестко закрепленной под наилучшим углом к горизонтали.

Экспериментальные исследования проведены на волновом канале Института механики МГУ. В качестве судна использовалась модель катамарана длиной 1,7 м и шириной 1 м. Волнодвижители различных типов имели примерно одинаковую площадь. В условиях килевой и вертикальной качки проведены испытания прямоточного волнодвижителя (жестко соединенной с судном наклонной пластины), эластичных пластин (плавников), волнодвижители – паруса, поворачивающиеся жесткие профили. Исследования проведены в широком диапазоне длин волн, при различных параметрах как самих волнодвижителей, так и различном размещении их на корпусе судна. Обнаружено, что эффективность прямоточного волнодвижителя в условиях качки судна при носовом размещении близка к эффективности гибкой пластины (плавника). Гибкая пластина, размещенная на корме судна, значительно теряет в

эффективности по сравнению с носовым размещением. Однако, две гибкие пластины, расположенные в носовой и кормовой частях судна, обеспечивают примерное удвоение скорости движения судна против волн. Наибольшую эффективность показал волнодвижитель типа парус, расположенный в носовой части судна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00807).

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ИНВАРИАНТНЫЕ РЕШЕНИЯ И НОРМАЛИЗАТОР

А. А. Талышев

Новосибирский государственный университет

Система дифференциальных уравнений называется автоморфной относительно группы Ли, если все ее решения находятся на орбите одного из них [1, §25]. Перечень всех потенциально возможных типов автоморфных систем конечно-параметрической группы определяется неравенствами:

$$\max\{n, r_k\} \leq d_k \leq \min\{n + r_k, \nu_k\}, \quad r_k \leq r_{k+1} \leq r, \quad d_k \leq d_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots,$$

где n — размерность пространства независимых переменных, r — размерность группы, r_k — общий ранг k -го продолжения группы, ν_k — размерность k -го продолжения пространства независимых и зависимых переменных, и d_k — размерность орбиты решения в k -ом продолжении пространства.

Конечное продолжение (как правило нулевого порядка) всякой автоморфной системы является вполне интегрируемой системой [2].

Аutomорфная система максимального ранга, т.е. та, у которой $\rho_k = d_k - r_k = n$, участвует в групповом расслоении [1, §26]. А решения автоморфных систем меньшего ранга названы в [1, с. 336] дифференциально-инвариантными решениями. Каждое дифференциально-инвариантное решение характеризуется конечной неубывающей последовательностью размерностей d_0, \dots, d_{k_3} [3].

Пусть система дифференциальных уравнений E допускает конечномерную группу симметрий Ли G и H — подгруппа группы G .

Множество инвариантных решений системы E относительно подгруппы H инвариантно относительно действия преобразований из нормализатора $N(H)$ подгруппы H [1, §20, п.4].

В настоящей работе показано, что множество дифференциально-инвариантных решений системы E относительно подгруппы H с заданной последовательностью d_0, \dots, d_{k_3} инвариантно относительно действия преобразований из нормализатора $N(H)$ подгруппы H .

Отсюда, в частности, следует, что множество частично-инвариантных решений системы E относительно подгруппы H инвариантно относительно действия преобразований из нормализатора $N(H)$ подгруппы H .

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянников Л. В. *Групповой анализ дифференциальных уравнений*. М.: Наука, 1978.
2. Талышев А. А. *Об автоморфных системах конечномерных групп Ли*. Уфимский математический журнал. 2012. Т. 4. № 4. С. 130–138.

3. Талышев А. А. *О дифференциально-инвариантных решениях*. Сибирский журнал чистой и прикладной математики. 2016. Т. 16. № 3. С. 75–84.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ

Д. А. Терешко

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

Одно из важных прикладных направлений гидродинамики связано с решением обратных задач. Чаще всего такие задачи заключаются в восстановлении параметров среды, определении источников, а также функций, входящих в граничные либо начальные условия по некоторой известной информации о решении, полученной, например, в результате измерения тех или иных физических полей. Распространенным подходом при решении указанных задач является их сведение к задачам условной минимизации, в которых роль ограничения играет математическая модель, в качестве управлений выступают искомые параметры либо функции, а требования к физическим полям заданы функционалом качества. Задачи условной минимизации сводятся к задачам безусловной минимизации при помощи принципа неопределенных множителей Лагранжа. Затем выводится система оптимальности, описывающая необходимые условия экстремума первого порядка (см., например, [1]). Указанный подход имеет ряд преимуществ при теоретическом анализе, но численное решение систем оптимальности связано с большими трудностями. Наибольшую трудность представляют нестационарные задачи, а также сложные математические модели гидродинамики, учитывающие тепловые либо электромагнитные эффекты.

Для построения эффективных численных алгоритмов решения обратных задач гидродинамики предлагается использовать два подхода, не использующие необходимые условия экстремума. Первый подход, разработанный для нестационарных течений вязкой жидкости, основан на представлении управления в виде конечной линейной комбинации базисных функций с неизвестными коэффициентами (см. [2]). Эти коэффициенты находятся последовательно на каждом дискретном шаге по времени из условия минимизации квадратичного функционала. Второй подход использует идею метода роя частиц (см., например, [3]).

Проведена серия вычислительных экспериментов, направленная на выявление наиболее эффективных методов решения обратных задач для различных моделей гидродинамики. Исследуется влияние безразмерных параметров подобия, геометрии расчетной области, граничных условий, параметров алгоритма и других величин на точность численного решения обратной задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00365-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Терешко Д. А. *Численное восстановление граничного потока тепла для стационарных уравнений тепловой конвекции*. Сиб. журн. индустр. матем. 2014. Т. 17. № 4. С. 111–119.
2. Tereshko D. *Discrete optimization of unsteady fluid flows*. CEUR Workshop Proc. 2016. V. 1623. Pp. 293–302.
3. Алексеев Г. В., Левин В. А., Терешко Д. А. *Оптимизационный анализ задачи тепловой маскировки цилиндрического тела*. ДАН. 2017. Т. 472. № 4. С. 398–402.

СКОРОСТЬ РОСТА ПО ВРЕМЕНИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРОНТА ГОРЕНИЯ

А. В. Трилис

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

Профессор Б. В. Войцеховский был первым, кто предложил сжигать смесь в режиме непрерывной детонации с помощью поперечных вращающихся волн. Он реализовал данную идею на практике [1] в кольцевой камере сгорания при радиальной подаче смеси из центра к периферии (кольцевая камера плоско-радиального типа). Исследования таких волн в кольцевых камерах сгорания выявили важную особенность — скорость распространения редко достигает величины скорости идеальной детонации D_0 и чаще всего лежит в диапазоне от D_0 до скорости звука в продуктах детонации c_d (для газовых горючих смесей $c_d \approx 0.55D_0$). Объяснения такому поведению до сих пор не существует. В силу такого поведения поперечную детонационную волну принято называть квазидетонационной.

Из экспериментов [1] следует, что на начальном этапе поджига горючей смеси в кольцевой камере реализуется дефлаграционное горение, и возникают неустойчивые колебания и бегущие волны с малыми амплитудами. С течением времени неустойчивости развиваются в вышеописанные квазидетонационные волны. В работе [2] получены квазисобственные частоты (реальные значения определяют частоты колебаний, а мнимые значения квазисобственных частот определяют развитие колебаний во времени) и числовые значения скоростей неустойчивых вращающихся окружных волн возмущения цилиндрического фронта горения в кольцевой камере плоско-радиального типа методом линейной модовой устойчивости. В настоящей работе проанализированы скорости роста по времени (инкременты) неустойчивых волн цилиндрического фронта горения.

Инкремент определяется по формуле:

$$\gamma = \text{Im}(\omega_{kl}),$$

где ω_{kl} — квазисобственная частота, k — угловой (окружной) номер моды, l — радиальный номер моды.

По результатам работы можно заключить, что за распространение поперечной квазидетонационной волны в кольцевом канале отвечает развитие по времени неустойчивых окружных волн возмущения цилиндрического фронта горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский Б. В. *Спиновая стационарная детонация*. ПМТФ. 1960. № 3. С. 157–164.
2. A. V. Trilis, A. A. Vasiliev and S. V. Sukhinin. *Traveling circumferential unstable wave of cylindrical flame front*. Journal of physics: Conference series. 2016. V. 722. 012039.

ОБЪЯСНЕНИЕ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ С ПОЗИЦИИ ДЕТОНАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

В. С. Трофимов, М. И. Алымов, Е. В. Петров

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
Черноголовка*

В монографии М.П. Кащенко [1] развивается волновая модель протекающего в стали превращения аустенита в мартенсит, согласно которой, по крайней мере, внутри отдельных зерен аустенита это превращение протекает в виде волн, движущихся со сверхзвуковой скоростью. Для сталей определенных химических составов, обладающих макрокинетикой мартенситного превращения взрывного типа, можно ожидать появления макроэффекта формирования волны превращения детонационного типа. Как показал эксперимент в работе [2], возникающие мартенситные кристаллы со сверхзвуковой скоростью пронизывают объем зерна, формируя фронты возмущений, часть из которых обгоняет ударную волну, инициировавшую превращение. Согласно нашим оценкам, при данном превращении аустенита в мартенсит выполняется известный критерий детонационной способности [3]. При нормальных условиях плотность аустенита $\rho_a = 8000 \text{ кг/м}^3$, плотность мартенсита $\rho_m = 7750 \text{ кг/м}^3$, следовательно превращение аустенита в мартенсит при постоянных давлении $P = 10^5 \text{ Па}$ и температуре $T = 300 \text{ К}$ приводит к увеличению объема стали. При этом выделяется удельная теплота $Q_{P,T} = 82 \times 10^3 \text{ Дж/кг}$. Таким образом, на основании этих данных приходим к выводу, что если бы данное превращение удалось реализовать в крупном бруске стали, то оно протекало бы в виде детонации, т. е. в виде движения со сверхзвуковой скоростью волны физико-химического превращения, в данном случае в виде волны фазового перехода аустенита в мартенсит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кащенко М. П. *Волновая модель роста мартенсита при $\gamma - \alpha$ превращениях в сплавах на основе железа*. М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика". Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2010.
2. Мещеряков Ю. И., Кащенко М. П., Васильков В. Б., Атрошенко С. А. *О сверхзвуковом распространении фронтов мартенситных превращений, инициированных ударным нагружением*. Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 2. С. 75–78.
3. Гордополов Ю. А., Трофимов В. С., Мержанов А. Г. *О возможности безгазовой детонации конденсированных систем*. ДАН. 1995. Т. 341. № 3. С. 327–329.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

В. С. Трофимов, В. А. Веретенников

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
Черноголовка*

Разработан метод определения детонационных адиабат конденсированных систем по экспериментальным ударным адиабатам продуктов реакции, изначально предназначавшийся

для расчета параметров детонации безгазовых систем [1]. В работе показано, что метод применим к штатным ВВ, если использовать ударные адиабаты продуктов, сконденсированных глубоким охлаждением, поскольку сжатые до большой плотности продукты детонации можно рассматривать как конденсированную среду [2]. Калорическое уравнение состояния такой среды может быть представлено в виде

$$E(P, V) = E_y(V) + [P - P_y(V)]V/\Gamma(V), \quad (1)$$

где $E(P, V)$ — удельная внутренняя энергия; $E_y(V)$ и $P_y(V)$ — удельная внутренняя энергия и давление на ударной адиабате продуктов, соответственно; $\Gamma(V)$ — коэффициент Грюнайзена. Учитывая то, что удельная внутренняя энергия ВВ в начальном состоянии равна теплоте реакции при постоянном атмосферном давлении, $E_{00} = Q_p$, можно получить следующее выражение для детонационной адиабаты:

$$P_d(V) = P_y \frac{V(\Gamma + 2) - \Gamma V_0}{V(\Gamma + 2) - \Gamma V_{00}} + \frac{2\Gamma Q_p}{V(\Gamma + 2) - \Gamma V_{00}}, \quad (2)$$

где $P_y = P_y(V)y$, $\Gamma = \Gamma(V)$ и V_{00} — удельный объем ВВ в начальном состоянии. Определив эти функции по экспериментальным данным, можно найти и уравнение детонационной адиабаты.

Функция $P_y(V)$ определяется по экспериментальным ударным адиабатам компонентов продуктов по методу [3]:

$$V_y(P) = \sum_i \alpha_i V_i(P), \quad (3)$$

где $V_y(P)$ — удельный объем на ударной адиабате продуктов, и суммирование ведется по всем компонентам i ; α_i — массовая доля i -го компонента продуктов, определяемая по уравнению реакции разложения ВВ; $V_i(P)$ — удельный объем на ударной адиабате i -го компонента.

Приводятся результаты расчетов параметров детонации для ряда штатных ВВ при разных начальных плотностях и их сравнение с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимов В. С. *Построение ударной или детонационной адиабаты реагирующей конденсированной среды по ударной адиабате продукта реакции*. Сб. Международная конференция VI Забабахинские научные чтения, Снежинск. 2001 г. С. 68.
2. Ландау Л. Д., Станюкович К. П. *Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ*. Докл. АН СССР. 1945. Т. 46, №9. С. 399–402.
3. Дремин А. Н., Карпухин И. А. *Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ*. ПМТФ. 1960. №3. С. 184–188.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ И ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В МЕТАНОВЫХ СМЕСЯХ

А. В. Троцюк, П. А. Фомин

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

В представленной работе выполнено численное исследование нерегулярной двумерной многофронтной (ячеистой) структуры детонационной волны (ДВ) в стехиометрических метано-воздушной и метано-кислородной смесях, и в переобогащенной топливом ($\varphi=1,5$) метано-воздушной смеси вблизи верхнего (богатого) концентрационного предела, при нормальных начальных условиях.

Для этого в [1] нами была разработана двухстадийная модель кинетики детонационно-горения метана в кислороде и воздухе. Предложенная модель кинетики имеет высокую точность и согласована со вторым началом термодинамики. Константы модели имеют четкий физический смысл. Модель удобна для проведения многомерных численных расчетов детонационных процессов.

Проведено численное моделирование двумерной структуры ДВ в стехиометрических метано-воздушной и метано-кислородной смесях в широком диапазоне поперечных размеров канала H [2] при адекватном описании всех термохимических параметров смеси. Изучены изменения в установившейся многофронтной структуре самоподдерживающейся ДВ при вариации ширины канала. Исходя из этого, поперечный размер детонационной ячейки a_0 в стехиометрических метано-воздушной и метано-кислородной смесях определен равным $a_0 = 33 \div 35$ см и $a_0 = 0,3 \div 0,35$ см соответственно, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными. Далее был определен размер детонационной ячейки в богатой метано-воздушной смеси, $a_0 = 45 \div 50$ см. Во всех указанных расчетах была воспроизведена двумерная нерегулярная ячеистая структура ДВ со всеми основными ее особенностями, наблюдаемыми в эксперименте.

Далее было проведено численное моделирование непрерывной спиновой детонации (НСД) стехиометрической метано-кислородной смеси в цилиндрической детонационной камере (ДК) типа ЖРД. Исследована глобальная структура течения в ДК и детальная структура фронта вращающейся поперечной ДВ (ПДВ). Получены интегральные характеристики детонационного процесса — распределение усредненных величин статического и полного давления по длине ДК, получена величина удельного импульса. Определены геометрические пределы и область определяющих параметров, при которых реализуется стабильное существование НСД.

Все расчеты были выполнены на суперкомпьютере МВС-100К Межведомственного Суперкомпьютерного Центра (МСЦ РАН), Москва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fomin P. A., Trotsyuk A. V., Vasil'ev A. A. *Approximate model of chemical reaction kinetics for detonation processes in mixture of CH_4 with air*. Combustion Science and Technology. 2014. V. 186. № 10–11. Pp. 1716–1735.
2. Fomin P. A., Trotsyuk A. V., Vasil'ev A. A. *Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures*. J. of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. V. 36. Pp. 394–403.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ С ВЫРЕЗОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

В. А. Туркова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

Элементы конструкций, находящиеся в реальных эксплуатационных условиях, нередко испытывают воздействие переменных температур и нагрузок. Если тело деформируется упруго, то при переменных нагрузках прочность определяется усталостными характеристиками материала, разрушение наступает после большого числа циклов. Если же тело испытывает упругопластическую деформацию, то при нагрузке ниже предельной возможно достижение опасного состояния при сравнительно малом числе циклов. При этом следует различать два случая. Первый — разрушение наступает вследствие чередования пластических деформаций разного знака (например, после пластического растяжения происходит пластическое сжатие и т.д.). Это — знакопеременная пластичность (пластическая или малоцикловая усталость). Второй — пластические деформации нарастают с каждым циклом, что приводит к недопустимому их накоплению (прогрессирующая деформация — рэтчетинг).

В настоящей работе в многофункциональном конечно-элементном пакете SIMULIA Abaqus выполнено пошаговое моделирование задачи о двухосном циклическом нагружении образца с концентратором напряжений. В качестве которого использовались пластины с центральными круговым и эллиптическим отверстиями [1]. На основании проведенного вычислительного эксперимента определены диапазоны нагрузок, при которых в пластине с центральным отверстием при заданной конфигурации нагрузки достигаются режимы приспособляемости, знакопеременной пластичности и рэтчетинга. Диаграмма позволяет определить для конструкции те величины нагрузок, при которых ее работа будет безопасной, то есть будет реализовываться режим приспособляемости, и, тем самым, избежать опасных режимов работы.

Также, было выявлено, что границы диапазонов распределения типов асимптотического поведения определенной конструкции, подверженной одинаковому по структуре нагружению, для различных материалов совпадают и ложатся на одну кривую. Предложена удобная нормировка результатов вычислительного эксперимента [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Туркова В. А. *Различные режимы циклического нагружения неупругой пластины: конечно-элементный анализ двухосного нагружения упругопластической пластины с вырезом*. XX Зимняя школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Екатеринбург.: РИО УрО РАН, 2017. С. 349.
2. Туркова В. А., Степанова Л. В. *Различные режимы циклического нагружения неупругой пластины: конечно-элементный анализ двухосного нагружения упругопластической пластины с эллиптическим вырезом*. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 3. С. 207–221.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ, МИКРОДЕФОРМАЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ГЕОМОДЕЛЯХ С ПОЛОСТЬЮ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ НАПРЯЖЕНИЙ

О. М. Усольцева, В. И. Востриков, П. А. Цой, В. Н. Семенов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

На основе лабораторных испытаний на одноосное и двухосное сжатие образцов в виде кубов с размером ребра 200 мм из искусственного геоматериала, имеющих цилиндрическую полость, проведено исследование процесса деформирования до разрушения с использованием многопараметрического измерительного комплекса с синхронной регистрацией напряжений, деформаций, микродеформаций, сигналов микросейсмической эмиссии (МСЭ).

Комплексный анализ эволюции сигналов микросейсмической эмиссии, микродеформаций, напряжения и деформации позволил проанализировать пространственно-временные закономерности изменения параметров сигналов МСЭ, компонент поля микродеформаций спекл-методом и их скоростей в зависимости от уровня нагрузки на диаграмме “напряжение-деформация”.

При нагрузках, не превышающих $0,25 \div 0,5$ пиковой, поле микродеформаций является хаотично неоднородным, количество сигналов МСЭ незначительно, частотный спектр сигналов широкополосный. При нагрузках от $0,4 \div 0,5$ до $0,7 \div 0,8$ предела прочности, поле микродеформаций становится еще более неоднородным, возникают зоны максимальных микродеформаций, значения которых превышают средние значения по поверхности образца; возрастает количество и амплитуда сигналов МСЭ, их частотный спектр сужается и смещается в сторону низких частот.

При нагрузках от $0,7 \div 0,8$ до предела прочности количество и амплитуда сигналов МСЭ возрастает в несколько раз, его полоса значительно сужается и еще более смещается в низкочастотную область. Карты пространственно-временного распределения сигналов МСЭ позволяют определить зоны локализации микроповреждений в определенном объеме геомодели. Анализ компонент поля микродеформаций на рабочей поверхности геомодели показывает, что, если в удалении от отверстия поле микродеформаций является относительно изотропным, то в окрестности отверстия преобладают зоны растяжения и сдвига, которые при дальнейшем увеличении нагрузки формируют область макроразрушения. Поверхности разрушения геомодели хорошо коррелируют с пространственным расположением источников сигналов МСЭ, а также полей микродеформаций. При выходе трещины на поверхность генерируется мощный низкочастотный сигнал.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-05-07566) на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. В. Уткин, В. М. Мочалова

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

К настоящему времени накопилось достаточно много данных о структуре детонационных волн, которые не находят объяснения в рамках классической модели. Например, в некоторых прессованных ВВ вместо химпика регистрируется рост давления в зоне реакции. Это явление обусловлено высокой начальной скоростью реакции гетерогенных ВВ, что приводит к их частичному разложению непосредственно во фронте ударной волны. В отношении гомогенных жидких ВВ существует убеждение о низкой начальной скорости реакции, а следовательно, и невозможности существования детонационных волн без химпика. Целью данной работы является доказательство возможности протекания химических реакций непосредственно во фронте ударной волны в жидких ВВ, что как и в прессованных ВВ, приводит к аномальному характеру течения в зоне реакции.

В качестве объектов исследования выбраны жидкие ВВ (нитрометан, тетранитрометан и бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль (ФИФО)) и их смеси с не детонирующими жидкостями (метанол, нитробензол и диэтилен триамин). Регистрация структуры зоны реакции осуществлялась интерферометром VISAR. В результате проведенных экспериментов получены следующие результаты:

– В чистом нитрометане за ударным скачком скорость монотонно уменьшается и в зоне реакции формируется химпик. В смеси нитрометан/диэтилен триамин регистрируется качественно иной характер изменения скорости. После скачка она продолжает возрастать, в окрестности 10 нс достигает максимума и только затем уменьшается. При этом отчетливо выраженный химпик практически отсутствует.

– В тетранитрометане течение в зоне реакции, как и в нитрометане, соответствует классической модели детонации. Ситуация однако принципиально меняется при добавлении метанола или нитробензола. В составах, близких к растворам с нулевым кислородным балансом химпик исчезает.

– В чистом ФИФО наблюдается частичное разложение ВВ во фронте ударной волны. Это приводит, в частности, к неустойчивости детонационного фронта. Добавки метанола или нитробензола в данном случае снижают скорость химической реакции и уменьшают долю ВВ, прореагировавшего во фронте.

Полученные результаты показывают, таким образом, что неклассические режимы детонации не представляют собой исключительное явление. Они наблюдаются в экспериментах не только с прессованными (гетерогенными), но и с жидкими (гомогенными) ВВ.

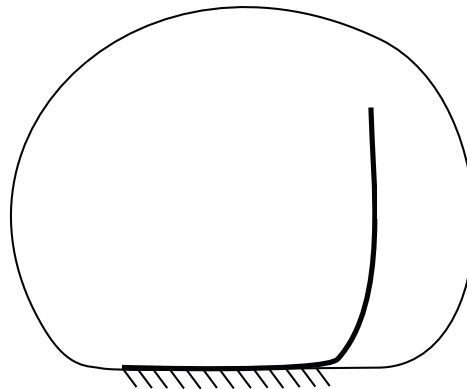
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-29-01002 “код офи_м”.

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ТОНКОЕ ЖЕСТКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

И. В. Фанкина

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

Исследуется задача равновесия для упругой пластины, содержащей тонкое включение, которое выходит на границу под нулевым углом и частично контактирует с недеформируемым препятствием. Тонкое включение является жестким, это означает, что его перемещения имеют определенную структуру. Деформирование упругой части пластины описывается в рамках модели Кирхгофа – Лява, неизвестными функциями являются вертикальные и горизонтальные перемещения точек срединной поверхности пластины. Предполагается, что на одном из берегов включения имеется отслоение, т.е. между включением и упругой частью пластины есть трещина. На берегах трещины, а также на линии контакта включения и недеформируемого препятствия, задаются условия, исключающие их взаимное проникание. Задача сформулирована в дифференциальном и вариационном виде. С помощью метода фиктивных областей доказано существование решения задачи. Кроме того, установлено, что решение единственно.



В работе [1] представлена задача, где в качестве неизвестных функций выступают горизонтальные перемещения. В статье [2] рассматривается задача равновесия упругой пластины с отслоившимся тонким жестким включением, выходящим на внешнюю границу под нулевым углом; предполагается как плоское деформирование пластины, так и изгиб.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-11-10000).

ЛИТЕРАТУРА

1. Khludnev A. M. *Contact problems for elastic bodies with rigid inclusions*. Quart. Appl. Math. 2012. V. 70. Pp. 269–284.
2. Khludnev A. M. *Thin rigid inclusions with delaminations in elastic plates*. Europ. J. Mech. A/Solids. 2012. V. 32. Pp. 69–75.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ В ПРИСУТСТВИИ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ

А. В. Федоров, Д. А. Тропин

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

Исследования воспламенения, горения и распространения детонационных волн (ДВ) в газовзвесах реагирующих газов и инертных микро- и наночастиц в настоящее время являются актуальными с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности промышленных производств, использующих смеси водорода, метана и силана в качестве рабочих тел. В частности, силан широко используется на предприятиях полупроводниковой промышленности как газообразный источник кремния. Силан является пирофорным веществом и при комнатных условиях при контакте с воздухом может самовоспламениться. Кроме того, этот газ используют как инициатор воспламенения водорода, который применяется в виде топлива в ракетных двигателях. Чтобы эффективно способствовать воспламенению или предотвращать взрывы реагирующих смесей газов, которые могут произойти при катастрофических утечках газов из емкостей хранения, следует развивать вопросы воспламенения, горения и детонации газовзвесей реагирующих газов и инертных твердых частиц в открытых и замкнутых пространствах. Это позволит определить критерии взрыво- и пожаробезопасности промышленных производств.

В данной работе предложены физико-математические модели для описания процессов воспламенения, горения и распространения ДВ в смесях водорода, метана и силана с инертными микро- и наночастицами. На их основе определено влияние инертных микро- и наночастиц на процессы распространения ДВ. Выявлено, что в газовзвесах с наночастицами существуют те же типы детонационных течений, что и в газовзвесах с микрочастицами: 1. стационарное распространение ослабленной ДВ со скоростями меньшими скорости Чепмена-Жуге; 2. разрушение ДВ. Оказалось, что механизмы подавления детонации микро- и наночастицами являются близкими и выражаются в распаде ДВ на затухающую замороженную ударную волну и отстающий фронт воспламенения и горения.

Найдены зависимости дефицита скорости детонации от размера и концентрации инертных микро- и наночастиц. Рассчитаны концентрационные пределы детонации. Показано, что пределы детонации в рассматриваемых смесях близки для частиц диаметрами от 10 нм до 1 мкм. Определено, что нарушается тенденция в увеличении эффективности подавления ДВ с уменьшением размера инертных частиц при переходе от микро- к наноразмерным частицам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-08-01947-а, 16-08-00778-а).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В БИДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

А. В. Федоров, Т. А. Хмель, С. А. Лаврук

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

Исследование распространения гетерогенной детонации актуально для различных приложений, таких как создание детонационных технологий, или задач подавления детонации в каналах технических устройств при техногенных катастрофах. При этом фундаментальной задачей является анализ возможности распространения детонации в каналах различной геометрии. Ниже нами рассматривается проблема о выходе плоской волны гетерогенной детонации (режим Чепмена-Жуге) в канал с линейным расширением. Канал может быть заполнен как моно-, так и бидисперсной смесями частиц алюминия.

Используется двухтемпературная двухскоростная модель механики многофазных сред. Горение алюминия описывается приведенной кинетикой, инициируемой после достижения критической температуры, с учетом неполного сгорания частиц. Модель горения учитывает переход от диффузионного режима к кинетическому при размере частиц менее 3.5 мкм. Численная технология основана на TVD схеме для газа и схеме Джентри-Мартина-Дэйли.

В результате расчетов определены следующие режимы распространения детонации для монодисперсных смесей: докритический, критический, закритический режимы распространения. Для бидисперсной смеси, получаемой при добавлении 5% частиц алюминия размером 1 мкм к монодисперсной смеси частиц алюминия размером 3.5 мкм при докритическом режиме распространения происходит переход к критическому режиму распространения. С последующим увеличением концентрации частиц размером 1 мкм наблюдается ослабление поперечных волн в канале и переход к закритическому режиму распространения. При преобладающей концентрации частиц 1 мкм вновь происходит образование поперечных волн.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (код проекта 16-19-00010).

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО МЕТОДА ГАЛЕРКИНА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

В. Е. Федоров

*НИИ математики Северо-Восточного федерального университета имени
М. К. Аммосова, Якутск*

Во многих прикладных задачах механики возникают уравнения с частными производными, которые в разных частях области их задания имеют разный тип. Их принято называть уравнениями смешанного типа. При исследовании разрешимости краевых задач для таких уравнений широко применяется метод Галеркина [1]. При этом важное значение имеет оценка погрешности этого конструктивного метода.

В работе [2] с помощью нестационарного метода Галеркина в сочетании с методом регуляризации была установлена однозначная регулярная разрешимость краевой задачи для уравнения смешанного типа высокого порядка, постановка которой существенно отличается от задачи Врагова и первой краевой задачи [1].

В настоящей работе при тех же условиях на коэффициенты и правую часть уравнения для приближенных решений, построенных в [2], получена оценка их погрешности относительно точного решения задачи через параметр регуляризации и собственные значения спектральной задачи для соответствующего эллиптического уравнения, собственные функции которой выбираются в качестве базиса при построении приближенных решений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания на выполнение НИР на 2017-2019 годы (проект №6069).

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров И. Е., Федоров В. Е. *Неклассические уравнения математической физики высокого порядка*. Новосибирск: Изд-во ВЦ СО РАН, 1995.
2. Егоров И. Е., Федоров В. Е. *Об одной краевой задаче для уравнения смешанного типа высокого порядка*. Математические заметки ЯГУ. 1999. Т. 6. № 1. С. 26–35.

ВОЛНООБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕД ГЛИССИРУЮЩЕЙ ПЛАСТИНКОЙ

Е. В. Филатов, А. Ю. Якимов

Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

В докладе представлены результаты проведенных в гидроканале МГУ экспериментов по движению пластинки, жестко закрепленной на динамометрической тележке. Целью этих исследований было изучение волнового следа за телом и течения перед ним в жидкости конечной глубины при околокритических скоростях движения и малых углах глиссирования. Наблюдения показали, что стационарный периодический волновой след возникает вместе с носовой волной неизменной формы, а при отставании кормовых волн возбуждаются волны перед глиссирующей пластинкой. Получено экспериментальное подтверждение известной формулы Рассела для амплитуды уединенной волны. С точностью до малых параметров показано ее совпадение с результатом М.А. Лаврентьева для уединенной волны. Приводятся результаты численного моделирования условий эксперимента с использованием программного комплекса XFlow компании “Next Limit Technologies”. Результаты экспериментов в гидроканале совпадают с численными. Аналитически получена приближенная формула для сопротивления пластинки, получившая подтверждение в численных экспериментах.

ПРИВЕДЕННАЯ ДЕТОНАЦИОННАЯ КИНЕТИКА И СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ОДНО- И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЯХ

П. А. Фомин, А. В. Троцюк, А. А. Васильев

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

На примере метана, окиси углерода и водорода впервые предложена двустадийная приведенная модель химической кинетики детонационного сгорания одно- и многокомпонентных газовых смесей. Полагается, что общее количество атомов углерода в смеси меньше соответствующего количества атомов кислорода. Первая стадия модели – период индукции, вторая стадия – зона основного тепловыделения. Длительность периода индукции рассчитывается по известным зависимостям периода индукции отдельных компонент от параметров смеси.

Реальные многостадийные процессы, проходящие во время периода индукции, заменяются брутто-реакцией, которая удовлетворяет следующим условиям. Суммарное тепловыделение к моменту окончания периода индукции много меньше максимально возможного теплового эффекта, соответствующего полной рекомбинации продуктов реакции. К моменту окончания периода индукции все молекулы углеводорода разлагаются, и газовая смесь состоит из молекул CO, H₂, OH и H.

Концентрации реагирующих компонент во время периода индукции рассчитываются по явным алгебраическим формулам в зависимости от доли периода индукции. В зоне основного тепловыделения молярная масса газа рассчитывается с помощью одного обыкновенного дифференциального уравнения. Для расчета внутренней энергии смеси и тепловыделения предложены явные алгебраические формулы. Константы предложенной модели имеют четкий физический смысл. Модель проста и позволяет существенно сократить объем численных расчетов по сравнению с моделями детальной химической кинетики. В то же время она обладает высокой точностью. Модель описывает и состояние химического равновесия, согласована со вторым началом термодинамики и принципом Ле-Шателье.

С помощью предложенной кинетической модели сделаны расчеты параметров и структуры детонационной волны в метано-воздушной смеси различной стехиометрии. Получены все основные экспериментально наблюдаемые особенности нерегулярной структуры волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-03-01351-а).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УВЛАЖНЕННЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТРУЙ

Н. С. Харьков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Представлено сопоставление результатов расчета нестационарной неизотермической увлажненной свободной струи, полученных двумя способами:

- Численное моделирование в пакете FLUENT программного комплекса ANSYS 15.0 методом крупных вихрей (LES)
- Численное решение системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями задачи Коши (представленная математическая модель) методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Удовлетворительное соответствие полученных результатов позволяет рекомендовать использование представленной математической модели для использования в проектных расчетах (специалистами, не имеющими достаточной квалификации для работы с программными комплексами численного моделирования) для первоначальной оценки закладываемых инженерных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аль-Маусаве И. Б., Гурович М. В., Кузнецов А. Д., Поташник Э. Л. *Модель интегрального баланса для оценки воздухообмена карьеров*. РГГМИ, СПб, 1994 - 44с. Деп. в ВИНТИ, 812-В-94 от 04.04.1994 г.
2. Бакланов А. А. *Численное моделирование в рудничной аэрологии*. Апатиты: АН СССР, Кольский филиал, Горный ин-т, 1988.
3. Поташник Э. Л. *Численное моделирование процессов загрязнения и вентиляции открытых горных разработок*. (дисс. на соиск. уч. степ. к.ф.-м.н.) -Л.:1986, Ленинградский Гидрометеорологический институт. - 239 с.

ЗАПОЛНЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЕМКОСТИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ЛИТЬЯ

Е. И. Хегай

Томский государственный университет

Одной из стадий технологии переработки полимерных материалов является заполнение емкостей различных конфигураций методами свободного литья или литья под давлением. Для организации эффективного и бездефектного производства изделий необходимо знать кинематику течения. В настоящем исследовании рассматривается процесс заполнения плоской прямоугольной емкости вязкой несжимаемой жидкостью в случае подачи жидкости через щель в верхней стенке.

Математическая постановка задачи включает уравнения Навье-Стокса и неразрывности. На стенках выполняется условие прилипания, жидкость подается с заданным постоянным расходом. Силами поверхностного натяжения пренебрегаем, в связи с их малостью для рассматриваемых процессов. Задача решается численно, с использованием технологии VoF [1]. При этом для перемещения свободной границы во времени применяется метод Plis [2].

В результате проведенных параметрических исследований выявлены основные режимы течений. Продемонстрировано влияние параметров задачи на распределение кинематических характеристик и эволюцию свободной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №9.9625.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nichols B. D., Hirt C. W., Hotchkiss R. S. *SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries*. Los Alamos Scientific Laboratory, LA-8355, 1980.
2. Jang W., Jilesen J., Lien F. S., Ji H. *A study on the extension of a VOF/PLIC based method to a curvilinear co-ordinate system*. Internal Journal of Computational Fluid Dynamics. 2008. V. 22. № 4. Pp. 241–257.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В
УПРУГИХ ТЕЛАХ

А. М. Хлуднев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В докладе рассматриваются задачи идентификации параметров жесткости тонких включений, расположенных в упругих телах. Предполагается, что включения могут отслаиваться, образуя тем самым трещину на границе с матрицей. На берегах трещин задаются нелинейные краевые условия, обеспечивающие взаимное непроникание противоположных берегов. Задачи идентификации формулируются в виде проблем оптимального управления, где в качестве функции управления выступает параметр жесткости тонкого включения. Установлена разрешимость широкого класса указанных проблем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-11-10000).

ЛИТЕРАТУРА

1. Khudnev A. M. *Thin inclusions in elastic bodies crossing an external boundary*. ZAMM. 2015. V. 95, N 11. Pp. 1256–1267.
2. Khudnev A. M. *Rigidity parameter identification for thin inclusions located inside elastic bodies*. J. Opt. Theory Appl. 2017. V. 172, N 1. Pp. 281–297.

ЯЧЕИСТАЯ ДЕТОНАЦИЯ В ГАЗОВЗВЕСЯХ НАНОРАЗМЕРНЫХ
ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Т. А. Хмель

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

Детонационное горение нанодисперсных порошков, в том числе и в детонационном режиме, представляет большой интерес. Перспективными компонентами являются смеси порошка алюминия с окислителем или реагирующими газовыми смесями.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования формирования и распространения ячеистой детонации в стехиометрических смесях частиц алюминия и кислорода. Модель детонационного горения алюминия описывается реакцией приведенной кинетики с учетом перехода от диффузионного режима к кинетическому при уменьшении размера частиц. Зависимости скорости реакции от температуры, давления и размера частиц определены на основе совокупности данных экспериментов, приведенных в [1]. Транспортные свойства и теплообмен нанометровых частиц описываются с учетом перехода от континуального к свободно-молекулярному режиму [1].

Начально краевая задача отвечает инициированию детонации в плоском канале при вхождении сильной УВ в облако газозвеси с возмущением плотности на кромке [2]. Применялась тестированная ранее схема Хартена TVD для газа и Джентри-Мартина-Дэйли для частиц.

Особенностью горения частиц алюминия в кинетическом режиме является высокое значение энергии активации 60 КДж/моль, что обуславливает свойства ячеистой детонации взвесей субмикронных и наноразмерных частиц. Ячеистые структуры характеризуются нерегулярностью. Первоначально из малых возмущений формируются мелкие ячейки, которые потом перестраиваются и укрупняются. В развитой ячеистой детонации максимальные давления при столкновении поперечных волн достигают 40 – 50 МПа, что втрое выше, чем в микроразмерных взвесах (15 МПа) [2]. В фазе затухающей детонации между расходящимися поперечными волнами образуются значительные зоны непрореагировавших частиц. Их горение происходит впоследствии «взрывным» образом в сходящихся поперечных волнах. Отметим, что для микроразмерных частиц при энергии активации 32 кДж/моль [2] такого поведения не обнаруживалось. Таким образом, ввиду нерегулярности ячеистых структур представляется затруднительным определение зависимости размера ячейки от диаметра наноразмерных частиц как в [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00778).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандарам Д., Янг В., Зарко В. Е. *Горение наночастиц алюминия (обзор)* ФГВ. 2015. Т. 51. № 2. С. 37–63.
2. Федоров А. В., Хмель Т. А. *Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде* ФГВ. 2005. Т. 41. № 4. С. 84–98.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ЛАМИНАРНО–ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Д. В. Хотяновский, А. Н. Кудрявцев

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

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на развитие турбулентности в пограничном слое на поверхности летательного аппарата, является присутствие шероховатости,

которая может приводить к более раннему ламинарно-турбулентному переходу и повышенному нагреву при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях полета [1].

В настоящей работе проведено прямое численное моделирование эффектов распределенной шероховатости с помощью кода CFS3D для численного решения уравнений Навье–Стокса и его гибридной CPU/GPU CUDA версии NuCFS. Численный код основан на TVD и WENO схемах сквозного счета высокого порядка точности для вычисления конвективных потоков уравнений Навье–Стокса и поэтому обладает возможностью надежного расчета сверхзвуковых течений с разрывами и точного моделирования нестационарных волновых процессов. Результаты прямого численного моделирования показывают локальные искажения среднего течения вблизи элементов шероховатости и образование подковообразных стационарных структур на элементах. Из-за индуцированных градиентов скорости в следе за элементами шероховатости образуются продольные вихревые структуры. Развитие этих структур вниз по потоку, по-видимому, сопровождается вторичной неустойчивостью развившихся сдвиговых слоев, что приводит к появлению нестационарных трехмерных пульсаций. Интенсивность продольных вихрей зависит от размера элемента шероховатости. Наиболее выраженные эффекты искажения течения вносятся элементами с высотой $h > 3\delta$ (где δ — блазиусовская толщина пограничного слоя), что соответствует числу Рейнольдса по локальным параметрам течения $Re_{kk} > 500$. Далее вниз по потоку, нарастание пульсаций, содержащихся в продольных вихрях, и взаимодействие соседних вихрей приводят к взрыву пограничного слоя, что знаменует начало ламинарно-турбулентного перехода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-11-00490). Расчеты проводились на вычислительных кластерах Новосибирского государственного университета и Межведомственного суперкомпьютерного центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schneider S.P. *Effects of Roughness on Hypersonic Boundary-Layer Transition*. Journal of Spacecraft and Rockets. 2008. V. 45. No. 2. Pp. 193–209.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНИКА В УСЛОВИЯХ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ

П. А. Цой^{1,2}, И. П. Хоменок¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

Многоступенчатый тест при объемном сжатии является альтернативой проведения трехосных испытаний на множестве образцов (не меньше трех) для описания механического поведения (огibaющая кругов Кулона–Мора) горных пород [1].

Процедура испытания образцов горных пород при многоступенчатом объемном сжатии состоит из нескольких шагов [2]. Сначала прикладывается боковое давления первого уровня, а затем постепенно увеличивается осевая нагрузка до тех пор, пока образец не начнет испытывать пластические деформации. После этого инициируется постепенная разгрузка образца с контролем скорости деформации до равенства величин бокового и осевого давлений. Затем

боковое давление увеличивается до достижения второй заданной величины, возобновляется осевая нагрузка вплоть до наступления второго уровня пластических деформаций. Такая процедура повторяется несколько раз. В конце испытания образец доводится до разрушения.

Данная работа базируется на экспериментальных результатах исследования образцов песчаника двух видов в условиях многоступенчатого объемного сжатия (5 ступеней). Получены эмпирические зависимости модуля упругости, коэффициента Пуассона, величины удельной энергоемкости деформирования от величины бокового давления на каждой из ступеней. Построены огибающие кругов Кулона-Мора. Испытания горных пород в условиях многоступенчатого объемного сжатия могут быть целесообразными при очень ограниченном количестве образцов.

Экспериментальные исследования проведены на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Youn H. Tonon F. *Multi-stage triaxial test on brittle rock*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2010. V. 47. Iss. 4. Pp. 678–684.
2. Bro A. *Analysis of multistage triaxial test results for a strain-hardening rock*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 1997. V. 34. Iss. 1. Pp. 143–145.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЛИННОВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ НА КЛИНЕ И МЕТОД МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

И. С. Цырюльников, С. В. Кириловский, Т. В. Поплавская

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

В работе рассматривается задача взаимодействия длинноволновых возмущений внешнего потока с ударной волной (УВ), формирующейся при сверхзвуковом обтекании клина, с целью получения коэффициентов преобразования возмущений за УВ. В зависимости от типа возмущения набегающего потока при прохождении через УВ имеют различные амплитуды, что дает возможность выделения пульсаций различных мод из суммарного поля возмущений (модовая декомпозиция). Это в свою очередь, актуально для расширения возможностей экспериментальных исследований в области сверхзвуковой аэродинамики.

Получение решения задачи взаимодействия длинноволновых возмущений внешнего потока с УВ осуществлялось двумя способами: 1) разложение общего решения невязкой задачи о взаимодействии возмущений с УВ на клине [1] по малому параметру (отношение продольной координаты к длине волны возмущения) и 2) численное моделирование задачи взаимодействия в вязкой и невязкой постановке. Численное моделирование обтекания клина возмущенным сверхзвуковым потоком проводилось с использованием пакета ANSYS Fluent на основе решения двумерных уравнений Навье – Стокса. По данным параметрических расчетов коэффициентов преобразования длинноволновых внешних возмущений на УВ получены

зависимости коэффициентов преобразования от угла наклона УВ, угла распространения возмущений и числа Маха набегающего потока. Проведено сопоставление полученных данных с результатами теории [1].

Предложены принципиально новые методы модовой декомпозиции пульсаций в сверхзвуковых потоках, основанные на знании расчетных коэффициентов преобразования в совокупности с измеренными в эксперименте пульсациями давления на клине. Измерения пульсаций давления проведены в сверхзвуковой высокоэнтальпийной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН на специальном устройстве для экспериментальной реализации метода модовой декомпозиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00674).

ЛИТЕРАТУРА

1. Duck P. W., Lasseigne D. G., Hussaini M. Y. *On the interaction between the shock wave attached to a wedge and freestream disturbances*. Theor. Comp. Fluid Dyn. 1995. V. 7. Issue 2. Pp. 119–139.

О КРУГАХ МОРА

А. И. Чанышев

Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

Новосибирский государственный университет экономики и управления (НИНХ)

Круги Мора и полукруги Мора различаются между собой примерно так, как арифметический корень из числа отличается от алгебраического. Многие авторы, говоря о кругах, не подозревают, что на самом деле они говорят о полукругах Мора потому, что касательное напряжение на произвольной площадке определяется ими как корень арифметический из разности квадратов известных величин. Чтобы получить алгебраический корень, т.е. получить круги Мора, требуется перед радикалом поставить знак “плюс” или “минус”. Вопрос состоит в том, когда поставить “плюс” и когда “минус”, и что это будет означать. Отметим, что он имеет еще значение потому, что некоторые исследователи используют диаграмму Мора, точнее ее центр тяжести, для построения новых критериев и теорий пластичности (очевидно, что центр тяжести системы кругов не совпадает с центром тяжести системы полукругов). В данной работе знак перед радикалом связывается со знаком скалярного произведения орта первого главного направления тензора напряжений (или деформаций) и вектора касательного усилия (сдвиговой деформации) на площадке. Показываются преимущества такого определения по сравнению с другими возможными.

Введение знака перед радикалом для определения кругов Мора заставляет также пересмотреть определение полярной системы координат, то есть ввести знак полярного радиуса – считать радиус как координату вектора положительной координатой, если полярный угол изменяется в пределах от нуля до π , и отрицательной, если угол изменяется от π до 2π . В этом случае можно говорить о векторе, направленном в положительную сторону, и векторе, направленном в противоположную (отрицательную) сторону.

Третий момент. В теории упругости существует потенциал, когда работа тензора напряжений, рассматриваемого в виде вектора в шестимерном тензорном пространстве (пространстве А.А.Ильюшина), на изменениях тензора деформаций, рассматриваемого также в виде

вектора в том же пространстве, не зависит от пути изменения вектора напряжений (или деформаций) от одного состояния до другого. Здесь речь идет о некотором абстрактном пространстве. В то же время в теориях пластичности важным является рассмотрение физической площадки, на которой происходят изменения сил (усилий), смещений (относительных смещений). Поэтому здесь важна другая работа – работа вектора напряжений Коши на площадке на изменениях вектора деформаций, рассматриваемого на той же площадке (вектор деформаций строится как и вектор напряжений Коши, отражает относительные смещения точек рассматриваемой площадки). Получен следующий вывод – даже в случае применения закона Гука для изотропной среды данная работа не потенциальна (зависит от пути нагружения на площадке). Она становится потенциальной, если оба эти вектора относятся к площадкам, равнонаклонным к главным осям тензоров напряжений и деформаций. Такой же результат имеем для векторов приращений напряжений и приращений деформаций для любых других теорий упругости и пластичности, не связанных с октаэдрическими площадками. Ее (работу), можно сделать сколь угодно большой по абсолютной величине из-за этого пути. Вывод – физическими являются равнонаклонные площадки на кругах Мора.

ЗАДАЧИ КОШИ В СТАТИКЕ И ДИНАМИКЕ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ТЕОРИЙ УПРУГОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

А. И. Чанышев^{1,2}, О. Е. Белоусова², И. М. Абдулин²

¹Новосибирский государственный университет экономики и управления (НИИХ)

²Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

Работа посвящена построению численных и аналитических решений задач уравнений математической физики (и в том числе решениям уравнений теорий упругости, пластичности и запредельного деформирования) в постановке Коши, когда на какой-либо известной границе тела задаются одновременно и сама искомая функция и ее производная по нормали [1-4]. В качестве областей рассматриваются полуплоскость, полупространство, полупространство с цилиндрическим отверстием, полупространство со сферическим отверстием. В каждом случае строятся разностные схемы, алгоритмы, тестовые примеры. Показывается достаточно удовлетворительное сходство численных и аналитических решений.

В работе решаются: а) уравнение Лапласа для полуплоскости; б) волновое уравнение для полубесконечного стержня, когда на его конце заданы одновременно и смещение; в) задача теории упругости для полуплоскости; г) динамическая задача теории упругости для полуплоскости (плоская деформация); д) задача теории пластичности для цилиндрической выработки, когда на ее границе задаются одновременно и вектор напряжений Коши и вектор смещений (осесимметричный случай); е) динамическая задача теории упругости для полупространства.

Получены следующие результаты: в динамических задачах не требуется постановки начальных условий; если дифференциальные уравнения внутри области аппроксимируются по координате со вторым порядком точности, то для сохранения этого порядка точности определения функции на первом шаге от границы (для этого задается производная функции по нормали), шаг по координате делится на 10; общее решение складывается из аналитического

и решения с особенностями (особенности - решения уравнений с сосредоточенными источниками, находятся аналитически).

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Л. М. *Основы теории пластичности* М.: Наука, 1969.
2. Шваб А. А. *Некорректные статические задачи теории упругости*. Известия РАН. Механика твердого тела. 1989. №6. С. 98–106.
3. Шваб А. А. *Существенно переопределенная задача теории упругости*. Сибирский журнал индустриальной математики. 2001. Т. IV. № 1. С. 204–207.
4. Шваб А. А. *Обратная переопределенная задача для неоднородной упругой среды*. Сибирский журнал индустриальной математики. 2004. Т. VII. № 4. С. 141–147.

ДВИЖЕНИЕ ГАЗА В СИЛЬНО РАЗРЕЖЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Ю. А. Чиркунов

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск

Основные модели движения газа в трехмерном пространстве были получены в [1]. Модель, описывающая движение газа в сильно разреженном пространстве, получила несчастливый номер 13 в списке этих моделей. Одномерная версия этой модели была использована для решения задачи о сильном взрыве [2–4]. Исследование многомерной модели было начато в [5]. Для заданного начального распределения давления специальный выбор массовых лагранжевых переменных приводит к редукции дифференциальных уравнений, описывающих это движение, а именно, к системе, для которой число независимых переменных меньше на единицу. Следовательно, существует расслоение сильно разреженного газа по отношению к давлению. В сильно разреженном пространстве при каждом заданном начальном распределении давления, все частицы газа локализованы на двумерной поверхности, которая с течением времени движется в этом пространстве.

Для полученной системы найдены все нетривиальные законы сохранения первого порядка. Получены следующие точные решения системы: 1) решение, описывающее состояние среды за фронтом ударной волны после очень сильного взрыва, 2) решение, которое зависит от времени по экспоненциальному закону, и описывает следующие динамические процессы в сильно разреженной среде: или рассеяние частиц газа до бесконечности, или локализацию частиц газа вблизи неподвижной поверхности, 3) решение, которое описывает в сильно разреженном пространстве динамический процесс, в котором каждая частица совершает периодические колебания, 4) решение, которое описывает состояние среды после проведения серии очень сильных взрывов, 5) решения, которые описывают процессы, происходящие внутри торнадо.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00446 а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянников Ю. А. *Программа подмодели. Газовая динамика*. ПММ. 1994. Т. 58. № 4. С. 30–55.

2. Седов Л. И. *Распространение сильных взрывных волн*. ПММ. 1946. Т. 10. № 2. С. 241–250.
3. Taylor G. *The formation of a blast wave by a very intense explosion. I. Theoretical discussion*. Proceedings of the Royal Society. Ser. A. 1950. V. 201. Pp. 159–174.
4. von Neuman J., Bethe H. A., Fuchs K., Hirschfelder J. O. et al. *The point source solution. Blast wave*. Los-Alamos Scientific Laboratory Report LA-2000. 1958. P. 27–55.
5. Чиркунов Ю. А. *Законы сохранения и групповые свойства уравнений газовой динамики с нулевой скоростью звука*. ПМТФ. 2009. Т. 73. № 4. С. 587–593.
6. Chirkunov Yu. A. *Exact solutions of the system of the equations of thermal motion of gas in the rarefied space*. Int. J. of Non-Linear Mech. 2016. V. 83. Pp. 9–14.

СТАТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО–ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ СРЕДЫ

Ю. А. Чиркунов¹, Н. Ф. Бельмецев²

¹Новосибирский государственный архитектурно–строительный университет
(Сибстрин)

²Тюменский государственный университет

Выполнено групповое расслоение системы трехмерных дифференциальных уравнений статической деформации трансверсально–изотропной упругой среды (СДТИУС) с условиями Гассмана относительно бесконечной подгруппы, порожденной градиентом гармонической функции. Получено общее решение автоморфной системы. Это решение представляет собой трехмерный аналог формулы Колосова–Мухелишвили. Найдена основная группа Ли преобразований разрешающей системы этого группового расслоения. С помощью этой группы получены невырожденные точные решения уравнений (СДТИУС). Для найденных точных решений получены графические изображения соответствующих деформаций, возникающих в упругом теле для конкретных значений упругих модулей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-01-00446 а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Chirkunov Yu. A., Belmetcev N. F. *Exact solutions of three-dimensional equations of static transversely isotropic elastic model*. Acta Mechanica. 2017. V. 228. Pp. 333–349. DOI: 10.1007/s00707-016-1712-4.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ВИНТА

Г. А. Чичиндаев

Новосибирский государственный технический университет

При создании традиционных винтомоторных самолетов и винтов к ним используются данные многочисленных испытаний разных серий винтов. В качестве данных испытаний служат безразмерные характеристики - коэффициент тяги, коэффициент мощности и коэффициент полезного действия винта при различных значениях безразмерного коэффициента быстроходности винта.

Для исследований управляемого вектора тяги винтомоторных летательных аппаратов требуется знать не только осевую величину компоненты силы, действующую на лопасть, но и то где и под каким углом к оси вращения винта располагается равнодействующая аэродинамических сил при различных положениях лопасти к потоку, а также все эти величины в режиме раскрутки винта. Подобные величины не указываются в характеристиках винтов в виду своей специфичности.

Получить необходимые величины можно с применением программ вычислительной аэродинамики. Расчеты показывают неплохую сходимость с известными данными испытаний в аэродинамических трубах, что дает основания принимать результаты численных продувок в расчеты винтов с управляемым вектором тяги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравец А. С. *Характеристики воздушных винтов*. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1941.
2. Чичиндаев Г. А., Курлаев Н. В. *Численное моделирование характеристик воздушного винта*. Авиационная промышленность. 2016. № 2. С. 20–23.
3. Нейдорф Р. А., Сигида Ю. Л. *Компьютерное моделирование воздушного винта при исследовании его тягово-мощностных характеристик*. Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. № 4. С. 713–719.

ДВУХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ СИНТЕЗА КОМПОЗИТА TiC-NiAl В УСЛОВИЯХ МЕХАНОАССИСТИРОВАННОГО НАГРЕВА

Ю. А. Чумаков¹, А. Г. Князева^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

² Томский политехнический университет

В настоящей работе предложена модель синтеза многофазного композита из смеси порошков металлов (Ni и Al), в том числе, с добавками тугоплавких включений типа карбида титана TiC в условиях нагрева, совмещенного с механическим нагружением. В условиях эксперимента изменение структуры возможно как в матрице, так и в частицах, что приводит к необходимости разработки двухуровневой модели, включающей эволюцию свойств как в матрице, так и в частицах.

Для изучения особенностей влияния механических процессов на распространение зоны реакции выделяем плоский слой реагента, который может подвергаться растяжению, сжатию или сдвигу. Выделенное плоское сечение считаем неподвижным и сделанным из реакционно-способной смеси спрессованных частиц. Полагаем, что в результате нагрева, совмещенного с внешним механическим нагружением, происходят плавление алюминия, и образование интерметаллидных фаз, что в первом приближении описывается суммарной реакционной схемой “реагент - продукт реакции”. В качестве модели среды, которая используется при построении модели синтеза, выбрана модель вязкоупругого тела Максвелла, которая обобщается за счет учета зависимости свойств от состава и пористости, а также за счет учета появления в системе напряжений и деформаций, связанных с фактом химической реакции.

Тепловая часть задачи включает уравнение теплопроводности, связанное с деформациями и содержащее два вида источников тепла - вследствие химической реакции и вследствие вязкой диссипации, а также уравнение химической кинетики. Внешний нагрев находит отражение в граничных условиях задачи. Предполагается, что скорость химической реакции зависит от температуры по закону Аррениуса, а от концентраций - степенным образом. Напряженно-деформированное состояние может оказывать влияние на изменение активационного объема.

Для определения напряженно-деформированного состояния плоского слоя рассматриваем задачу о механическом равновесии пластины в приближении обобщенного плоского напряженного состояния. Граничные условия соответствуют характеру нагружения слоя (растяжение, сжатие, сдвиг) и условиям импульсного нагрева. Эволюция пористости и влияние пористости на изменение свойств композита учитывается аналогично известным моделям теории спекания.

Численная реализация предложенной двухуровневой модели потребовала разработки специального алгоритма, учитывающего наличие в системе различных пространственных и временных масштабов для разных физических процессов. Исследования модели показали отчетливое влияние эволюции пористости на динамику процесса синтеза композиционного материала, а также изменение режимов развития реакции при изменении условий нагрева и нагружения.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований РАН на 2017-2020. Проект: III. 23.2.2.

О РЕЛЯТИВИСТКОМ ВИХРЕ ОВСЯННИКОВА

А. П. Чупахин, А. А. Янченко

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

Точные решения уравнений гидродинамики, порожденные группой вращений, представляют большой интерес как для теории, так и для приложений. Исключительным среди них является решение типа “особого вихря” или “вихря Овсянникова”, которое описывает существенно трехмерные, завихренные движения газа и является частично инвариантным относительно группы вращений [1]. Исследованию этого решения для различных моделей математической физики посвящено много работ, отметим [2–4]. Важную роль при изучении этого решения играют неявные дифференциальные уравнения [5].

В работе изучается решение типа особого вихря для уравнений релятивистской газовой динамики (РГД) [6]. Доказано разложение системы уравнений РГД на инвариантную и не инвариантную компоненту. После введения обобщенного потенциала $h = h(R)$, первая сводится к неявному дифференциальному уравнению

$$e_0(R^2(R^2 - 1)h_R^2 - (1 + h^2)^2) = R^{\frac{4(\gamma-2)}{\gamma-1}}(1 + h^2)h_R^{\frac{-2}{\gamma-1}}(R^2(R^2 - 1)h_R^2 - m_0R^2h_R)^{\frac{2}{\gamma-1}}, \quad (1)$$

где γ — показатель адиабаты, e_0, m_0 — постоянные, характеризующие параметры газа. Радиальная скорость газа, модуль касательной компоненты скорости и термодинамические величины выражаются через функцию h и ее производные.

Построена поверхность уравнения (1) в пространстве 1-струй $\mathbb{R}^3(R, h, h_R)$, найдено многообразие ветвления решений этого уравнения, определены особые точки различной степени вырождения. Эти данные определяют решения различных типов, дается соответствующая физическая интерпретация.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 14.W03.31.0002 Правительства РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсянников Л. В. *Особый вихрь*. ПМТФ. 1995. Т. 36. № 3. С. 45–52.
2. Черевко А. А., Чупахин А. П. *Стационарный вихрь Овсянникова*. Препринт ИГиЛ СО РАН. 2005. № 1.
3. Чупахин А. П. *Инвариантные подмодели особого вихря*. ПММ. 2003. Т. 67. № 3. С. 390–405.
4. Golovin S. V. *Singular vortex in MHD*. J. Phys. A: Math. Gen. 2005. V. 38. Pp. 4501–4516.
5. Арнольд В. И. *Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений*. Ижевск, 2000.
6. Паули В. *Теория относительности*. Гостехиздат, 1947.

СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР ПРИ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ

М. Б. Шавелкина, Р. Х. Амиров, П. П. Иванов, Е. А. Филимонова

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Углеродные наноструктуры, благодаря уникальным химическим, физическим и механическим свойствам, находят широкое применение для научных и прикладных исследований. Они могут быть широко использованы в различных областях науки и техники: в точных приборах (электронике), в катализе, в малой энергетике, для создания материалов с высокими функциональными характеристиками. Для синтеза каждого типа углеродных наноструктур используется разный подход. Для синтеза фуллеренов и малодофектных углеродных нанотрубок наиболее распространен электродуговой метод, заключающийся в испарении графитовых и металл'графитовых электродов в дуге постоянного тока. Для получения углеродных нановолокон различных типов используют каталитический пиролиз углеродсодержащих соединений. Для формирования графеновых структур в существенных количествах перспективен метод химического и термического восстановления оксида графита [1].

В данной работе исследован способ синтеза различных углеродных наноструктур (от нанотрубок, онионов до графенов и графанов) путем конверсии газообразных углеводородов (пропано-бутановой смеси, метана и ацетилена) при их вводе одновременно с плазмообразующим газом в плазмотрон постоянного тока мощностью до 40 кВт. Полученный углеродный пар при охлаждении и нуклеации в плазмоструйном реакторе образовывал на металлических мишенях твердые продукты плазмохимического синтеза. В качестве плазмообразующего газа использовался азот, аргон или гелий при давлении в реакторе от 65 до 710 Торр. Варьируя род и скорости расхода плазмообразующего газа, скорости расхода углеводородов, силу тока дугового разряда и мощность плазмотрона получены оптимальные условия синтеза для каждой морфологии и структуры углеродных наноматериалов.

Для анализа влияния газовой фазы в плазменной струе на процессы синтеза проводилось моделирование ее состава. Для этого была использована кинетическая система из 712 реакций и 105 компонентов и программный комплекс РАДИКАЛ. В качестве начальных данных использовались данные термодинамических расчетов состава газовой фазы в зоне дугового разряда, основанные на минимизации функции Гиббса в пространстве координат реакций с учетом всех возможных состояний вещества. Результаты термодинамических расчетов показали высокое содержание атомарного водорода, который, как известно [2], участвует в нуклеации гексагонов углерода и их сборке в углеродную структуру. Численное моделирование состава плазменной струи показало наличие реакций, в результате которых появляются такие компоненты как C_2H_2 и C_6H_6 , которые являются предшественниками образования графеновых листов [2].

В результате моделирования получены данные, позволяющие оптимизировать параметры роста углеродных наноструктур заданной морфологии в плазмоструйном реакторе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-08-00165-а, 16-08-00145-а, 16-08-00081-а и 16-08-00057-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Б. П., Мурадян В. Е., Володин А. А. *Синтез, свойства и примеры использования углеродных наноматериалов* Известия Академии наук. Серия химическая. 2011. № 7. С. 1237–1249.
2. Khalilov U., Bogaerts A., Neyts E. C. *Microscopic mechanisms of vertical graphene and carbon nanotube cap nucleation from hydrocarbon growth precursors*. Nanoscale. 2014. № 6. P. 9206–9220.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В МОЛЕКУЛЯРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

А. В. Шапеев, Е. В. Подрябинкин, К. В. Губаев

Сколковский институт науки и технологий

Молекулярное (или атомистическое) моделирование — одна из самых важных областей в высокопроизводительных вычислениях. По статистике, на эту область исследований расходуется примерно половина всего суперкомпьютерного времени. Как правило, в типичной задаче молекулярного моделирования (например, в молекулярной динамике) используется один из двух классов моделей: квантово-механические модели или полуэмпирические модели. Полуэмпирические модели постулируют определенную функциональную форму энергии

взаимодействия атомов (из которой можно вывести и силы) с небольшим числом параметров, которые находятся либо из экспериментальных данных, либо из квантово-механических. Такие модели очень вычислительно экономичны, но воспроизводят поведение системы, как правило, только качественно. Квантово-механические модели, напротив, на 3–6 порядков более затратны, но имеют достаточно высокую точность.

В последнее время, вместе с “революцией больших данных” появился третий подход, который сочетает высокую точность квантово-механических моделей и вычислительную эффективность полуэмпирических моделей. Этот подход основан на постулировании такой функциональной формы энергии межатомного взаимодействия, чтобы аппроксимировать выбранную квантово-механическую модель с любой наперед заданной точностью за счет увеличения числа подгоночных параметров. Эти подгоночные параметры находятся из данных, сгенерированных квантово-механическими расчетами, на основе подходов машинного обучения.

В докладе будет сделан обзор существующих моделей межатомного взаимодействия, основанных на подходах машинного обучения, в том числе [1, 2], представлены подходы к автоматическому построению таких моделей на основе активного обучения [3], и продемонстрировано применение данного подхода к приложениям в молекулярной динамике, компьютерной разработке новых материалов, разработке сплавов и автоматическом построении их фазовых диаграмм [4].

ЛИТЕРАТУРА

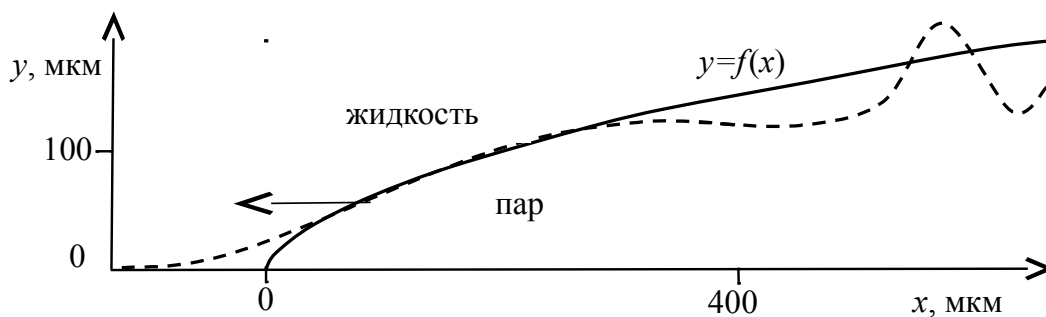
1. Shapeev A. V. *Moment Tensor Potentials: a class of systematically improvable interatomic potentials*. Multiscale Modeling & Simulation. 2015. V. 14. No. 3. Pp. 1153–1173.
2. Shapeev A. V. *Accurate representation of formation energies of crystalline alloys with many components*. arXiv preprint arXiv:1612.03359.
3. Shapeev A. V. *Active learning of linear interatomic potentials*. arXiv preprint arXiv:1611.09346.
4. Shapeev A. V. *Making machine learning interatomic potentials accurate, efficient, and reliable*. Abstracts of the APS March Meeting 2017. S32.00006 (available online).

САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИЙСЯ ФРОНТ ИСПАРЕНИЯ В МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

О. В. Шарыпов, Д. В. Красинский

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

Аналитически исследовано распространение самоподдерживающегося фронта испарения в перегретой жидкости вдоль плоского нагревателя. Форма стационарной межфазной поверхности проанализирована в рамках приближенной физико-математической модели. Получена аналитическая зависимость толщины парового слоя $y = f(x)$ от координаты и физических параметров. Решение представлено в безразмерной инвариантной форме. Теоретические результаты количественно соответствуют новым экспериментальным данным (см. рисунок): полученное аналитическое решение (сплошная линия) и экспериментальные данные [1]- [2] (пунктир).



Для данной поверхности проведено численное моделирование структуры потока жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-01359-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков В. Е., Кузнецов Д. В., Моисеев М. И., Барташевич М. В. *Динамика распространения самоподдерживающегося фронта испарения в условиях нормальной и микрогравитации*. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. В. 1 (12). С. 329–335.
2. Pavlenko A. N., Tairov E. A., Zhukov V. E., Levin A. A., Moiseev M. I. *Dynamics of transient process at liquid boiling-up in the conditions of free convection and forced flow in a channel under nonstationary heat release*. Journal of Engineering Thermophysics. 2014. V. 23. N 3. Pp. 173–193.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni_3Al , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Л. И. Шевцова¹, В. И. Мали², А. Г. Анисимов², Т. С. Огнева¹, Д. А. Немолочников¹

¹Новосибирский государственный технический университет

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

При разработке и изготовлении образцов новой техники, конкурентоспособной на внешних рынках, предъявляются высокие требования к используемым функциональным и конструкционным материалам. Применяемые материалы должны быть более прочными, жесткими и в то же время легкими, чем традиционные материалы, и в целом обладать повышенным комплексом механических, триботехнических и коррозионных свойств.

Интерметаллид Ni_3Al и сплавы на его основе относятся к одним из наиболее перспективных высокотемпературных материалов для ряда отраслей химической промышленности, энергетики, авиационного и космического машиностроения. Применение Ni_3Al в качестве высокотемпературного материала объясняется высоким комплексом физико-механических свойств данного интерметаллида при повышенных температурах, а также высокой температурой плавления и относительно низкой плотностью. Характерной особенностью Ni_3Al является аномальная зависимость некоторых его свойств (предел текучести и твердость) от

температуры. Из сплавов на основе Ni_3Al могут быть изготовлены: высокотемпературные штампы и формы для выплавки стекла, вкладыши матриц для горячего прессования цветных металлов; зажимные приспособления для термообработки деталей машин в высокотемпературных печах, а также сопла и лопатки турбин для реактивных двигателей.

Однако широкое применение интерметаллида Ni_3Al в промышленности ограничено. Это объясняется повышенной хрупкостью алюминидов никеля при комнатной температуре и сложностью изготовления деталей из полученных материалов. Улучшить показатели пластичности возможно путем легирования интерметаллидов различными элементами или формированием мелкозернистой структуры. Применение таких традиционных методов спекания порошковых материалов, как горячее изостатическое прессование или самораспространяющийся высокотемпературный синтез, сопровождается ростом зерен интерметаллида, отражающимся на свойствах полученных материалов.

Искровое плазменное спекание (Spark Plasma Sintering — SPS) представляет собой современную высокоэффективную технологию кратковременного спекания порошковых материалов. В отличие от традиционных методов спекания, SPS-технология позволяет контролировать основные параметры спекания, в частности, скорость нагрева, температуру спекания и время выдержки. Метод не требует предварительного уплотнения материала, порошок непосредственно засыпается в графитовую матрицу, через которую пропускается ток и прикладывается давление. В результате получается плотный материал с отличными механическими свойствами. Цель работы заключается в исследовании влияния легирующих элементов (В, Ni, B_4C) на механические свойства (микротвердость, предела прочности при изгибе и растяжении) интерметаллида Ni_3Al , полученного SPS-методом.

Спекание порошковых смесей проводилось в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН на установке Spark Plasma Sintering Labox-1575. Искровое плазменное спекание порошковых смесей осуществлялось в следующих условиях: давление прессования — 40 МПа; температура нагрева — 1100° С; скорость нагрева — 100° С/мин; время выдержки — 5 минут. В результате спекания были получены образцы цилиндрической формы диаметром 30 мм с относительной плотностью до 99 %.

Максимальный предел прочности при изгибе соответствует материалу, полученному спеканием алюминида никеля с добавлением 30 (мас.) никеля и составляет 2650 МПа, предел прочности при растяжении — 1200 МПа. Прочностные свойства полученного композита возрастают более чем в 3 раза по сравнению с компактированным материалом из интерметаллида Ni_3Al , сформированным при тех же условиях.

ДВУХФАЗНЫЕ ГРАНУЛИРОВАННЫЕ ЖИДКОСТИ

В. В. Шелухин

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

На основе базовых термодинамических принципов выводится новая математическая модель двухфазной гранулированной жидкости. Приложения связаны с суспензиями, угольно-водными топливами, течениями крови, транспортом пропанта к трещине гидроразрыва пласта и т.п. Модель позволяет учесть не только взаимодействия частиц с жидкостью, но и частиц между собой. Первая фаза представляет собой вязкую ньютоновскую жидкость. Гранулированность второй фазы описывается в рамках понятия континуума Коссера, когда каждая

материальная частица трактуется как твердое тело. При таком подходе, известном как теория микрополярных жидкостей (А.С. Eringen, 1999), принимаются во внимание микровращения и микроинерция. Важную роль в формулировке закона сохранения внутренних моментов играет тензор моментных напряжений и антисимметрическая часть тензора напряжений Коши [1].

В качестве иллюстрации рассматриваются течения типа Пуазейля между двумя параллельными плоскостями под действием заданного градиента давления. Обсуждаются различные классы реологических уравнений состояния и коэффициентов межфазного трения. Закономерен следующий вопрос: какая фаза течет быстрее, вязкая или гранулированная? В случае, когда парциальные плотности одинаковы, ответ оказывается неоднозначным, и он зависит от соотношения вязкостей. Выяснены условия, когда гранулированная фаза концентрируется в центре, возле стенок или где-то между ними. Ранее подобный вопрос изучался для однофазной жидкости [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства Российской Федерации (код проекта W03.31.0002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shelukhin V. V., Ruzicka V. *On Cosserat–Bingham fluids*. Z. Angew. Math. Mech. 2013. V. 93(1). Pp. 57–72.
2. Shelukhin V. V., Neverov V. V. *Thermodynamics of micropolar Bingham fluids*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2016. V. 236. Pp. 83–90.

ДВИЖЕНИЕ ПОДВОДНОГО ТЕЛА ПОДО ЛЬДОМ В КАНАЛЕ

К. А. Шишмарев¹, Т. И. Хабахпашева^{2,3} А. А. Коробкин^{2,3}

¹Алтайский государственный университет, Барнаул

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Университет Восточной Англии, Норидж, Великобритания

В работе исследуются колебания ледового покрова, вызванные движением с постоянной скоростью подводного тела в канале. Канал имеет прямоугольное сечение, жидкость считается невязкой и несжимаемой. Ледовая пластина приморожена к вертикальным стенкам канала. Подводное тело моделируется трехмерным диполем, интенсивность которого связана с размером тела и его скоростью. Потенциал диполя в канале определяется методом зеркальных отображений без учета прогиба ледового покрова. Задача рассматривается в рамках линейной теории тонких пластин. Решение задачи о движении диполя в канале с жесткими стенками определяет распределение гидродинамического давления по верхней границе канала, соответствующей ледовому покрову. Распределение давления не зависит от прогиба ледовой пластины в главном приближении. Задача о колебаниях ледового покрова сводится к задаче о движении стационарного внешнего давления по ледовой пластине вдоль канала. Имеются два основных подхода к решению задачи о гидроупругих волнах вызванных движением внешней нагрузки вдоль канала. В первом подходе параметры волн определяются как предельные характеристики нестационарных волн, которые устанавливаются при больших

временах. Во втором подходе волны в ледовом покрове считаются нераспространяющимися в системе координат, движущейся вместе с нагрузкой. Прогиб ледового покрова описывается уравнением тонкой упругой пластины в случае нестационарной задачи и уравнением вязкоупругой пластины в случае квазистационарной задачи. Для льда используется модель Кельвина-Фойгта вязкоупругого материала. Искомыми величинами являются прогибы льда и удлинения в ледовом покрове. Квазистационарная задача методом преобразования Фурье сводится к задаче относительно профиля колебаний поперек канала, которая решается методом нормальных мод. В докладе приводятся результаты численного и аналитического исследования описанных задач.

Задача о движении нагрузки по плавающей ледовой пластине подробно исследована в [1]. Задачи с одной стенкой исследованы в [2]. Задача движения внешнего локализованного пятна давления по льду, примороженному к стенкам канала рассмотрена в [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00291 А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Squire V., Hosking R., Kerr A., Langhorne P. *Moving loads on ice*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
2. Brocklehurst P. *Hydroelastic waves and their interaction with fixed structures*. PhD thesis, University of East Anglia, UK, 2012.
3. Shishmarev K., Khabakhpasheva T., Korobkin A. *The response of ice cover to a load moving along a frozen channel*. Applied Ocean Research. 2016. V. 59. Pp. 313–326.

ИНВАРИАНТНЫЕ РЕШЕНИЯ $K - \Omega$ МОДЕЛИ ДАЛЬНЕГО ТУРБУЛЕНТНОГО СЛЕДА

А. В. Шмидт

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Рассмотрена $k - \omega$ модель [1] дальнего турбулентного следа за телом. Искомыми величинами в данной модели являются дефект осредненной продольной компоненты скорости $U(x, y)$, кинетическая энергия турбулентности $k(x, y)$ и удельная диссипация кинетической энергии турбулентности $\omega(x, y)$.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{y^s} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{y^s k}{\omega} \frac{\partial U}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{1}{y^s} \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma^* \frac{y^s k}{\omega} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{k}{\omega} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \beta^* k \omega,$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{1}{y^s} \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{y^s k}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \beta \omega^2 + \sigma_d \omega^{-1} \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y},$$

где σ^* , σ , β^* , β , γ и σ_d — эмпирические постоянные, $s = 0$ для плоского течения и $s = 1$ в осесимметричном случае.

С помощью теоретико-группового подхода найдено представление для решений, позволяющее свести исходную модель к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены решения, удовлетворяющие всем краевым условиям и удовлетворительно согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., 2006.

ИМПУЛЬСНЫЙ ГАЗО-ДЕТОНАЦИОННЫЙ АППАРАТ КАК ГЕНЕРАТОР НАНОГЛОБУЛЯРНОГО УГЛЕРОДА (ГРАФЕНА)

А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев, Д. К. Рыбин

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

В последнее время повысился интерес к получению наноразмерного углерода путем детонационного разложения ацетилена или других углеводородов. Детонационный способ получения сажи известен давно [1, 2], но только недавно было обнаружено, что получаемый в определенных режимах детонации наноразмерный углеродный конденсат содержит особую форму углерода - наноглобулярный углерод, в зарубежной литературе именуемый порошкообразным графеном (graphene particulate material) [3, 4]. Углерод в подобной форме необходим для производства химических источников тока, изделий микроэлектроники, композиционных материалов, адсорбентов и т.д. Классические детонационные способы получения ацетиленовой сажи обладают рядом недостатков, в частности они требуют предварительного сжатия ацетилена до давлений 3,5 атм. и выше, поэтому к производству предъявляются требования безопасности высшей категории, что влечет за собой существенные дополнительные затраты. В ИГиЛ СО РАН на базе компьютеризированного детонационного комплекса ССДС2000 разработан импульсный газо-детонационный аппарат (ИГДА) и способ, позволяющий получать наноглобулярный углерод в автоматическом режиме без предварительного сжатия смеси топливо - окислитель [5]. Существенным преимуществом ИГДА и предложенного способа является возможность создавать в реакционной камере аппарата продольно стратифицированные заряды заданного состава в режиме проточной подачи газов. Это обеспечивает гарантированное детонационное разложение ацетилена, в том числе, с добавками других газов, и обеспечивает производительность до 1 кг продукта в час.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kistiakovsky G. B., Halsey G. D., Malin M. E., Knight H. T. *Detonation process of making carbon black*. U.S. Patent No. 2690960. Patented Oct. 5, 1954.
2. Кнорре В. Г., Копылов М. С., Теснер П. А. *Образование сажи при детонации ацетилена*. ФГВ. 1974. Т. 10, № 5. С. 767–771.
3. Sorensen C., Nepal A., Singh G. P. *Process for high-yield production of graphene via detonation of carbon-containing material*. U.S. Patent No. 9440857 B2. Patented Sept. 13, 2016.

4. Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Батраев И. С. и др. *Детонационное сжигание газообразных углеводородов в импульсном газодетонационном аппарате с получением наноглобулярного углерода*. Сб. тез. докл. Всероссийской школы-конференции с международным участием “Химия и физика горения и дисперсных систем”, посвященной 110-летию со дня рождения чл-корр. АН СССР А.А. Ковальского. Новосибирск. 2016 г. С. 54.
5. Васильев А. А., Пинаев А. В., Ульяницкий В. Ю. и др. *Способ получения наноуглерода*. Заявка на патент РФ № 2016132962. Приоритет от 09.08.2016.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АНИЗОТРОПНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ТОЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ

А. В. Шутов¹, А. Ю. Ларичкин¹, В. А. Шутов²

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

²Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

В работе исследуется вопрос отыскания параметров материала для феноменологической модели анизотропной ползучести, недавно предложенной в [1]. Модель ползучести учитывает нелинейное кинематическое упрочнение материала со статическим и динамическим отпуском. Таким образом, наведенная анизотропия материала описывается с помощью концепции микронапряжений, зависящих от истории нагружения. Кинематика конечных деформаций описана в геометрически точной постановке с помощью вложенного мультипликативного разложения Лиона (Lion). Модель термодинамически совместна и w -инвариантна. Модель встроена в комплекс МКЭ MSC.Marc как пользовательская модель материала с помощью интерфейса Nuprel2. В качестве экспериментального базиса для определения параметров материала выступает серия экспериментов по кручению толстостенных и тонкостенных трубчатых образцов из алюминиевого сплава Д16Т. Эксперименты представлены в [2]. В экспериментах трубчатые образцы нагружаются крутящим моментом, заданным как кусочно-постоянная функция времени. Рассмотрены различные сценарии нагружения, включая циклическое нагружение знакопеременным моментом. Примененная методика позволяет использовать для отыскания параметров материала эксперименты с неоднородным напряженно-деформированным состоянием (НДС). Прямая задача по кручению толстостенных образцов решается в коммерческом комплексе МКЭ MSC.Marc. Набор параметров материала определяется из решения обратной задачи путем минимизации функционала ошибки, отражающего среднеквадратичное отклонение расчетных углов закрутки образца от экспериментально измеренных. Показано, что после правильной калибровки модель материала может предсказывать механический отклик материала в широком диапазоне воздействий, включая эффект возникновения неустойчивости ползучести сразу после резкой смены приложенных усилий. Методика определения параметров на основе экспериментальных данных с неоднородным НДС может быть обобщена на другие классы нелинейных моделей, включая модели вязко-упругости и упруго-пластичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-01020).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shutov A. V., Larichkin A. Yu., Shutov V. A. *Modelling of cyclic creep in the finite strain range using a nested split of the deformation gradient*. accepted to ZAMM, 2017.
2. Горев Б. В. *К оценке ползучести и длительной прочности элементов конструкций по методу характеристических параметров. Сообщение 1*. Проблемы прочности. 1979. №4. С. 30–36.

ПРОИЗВОДНАЯ ИНТЕГРАЛА ЭНЕРГИИ ПО ФОРМЕ ОБЛАСТИ В НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧЕ О РАВНОВЕСИИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ С ТОНКИМИ ДЕФЕКТАМИ

В. В. Щербаков

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

Изучается круг вопросов, связанных с зависимостью решения нелинейной задачи о равновесии упругой пластины, содержащей тонкое жесткое включение и трещину, от формы области. Мы используем предложенную в [1] математическую модель, напряженно-деформированное состояние пластины в которой описывается уравнениями Кирхгофа — Лява. Нелинейность задачи обусловлена краевыми условиями типа Синьорини, заданными на берегах трещины и препятствующими их взаимному прониканию друг в друга. Доказана дифференцируемость функционала потенциальной энергии задачи по форме области и найдена явная формула для соответствующей производной. Доказательство базируется на вариационных свойствах слабого решения задачи равновесия и в техническом плане развивает идеи, изложенные в [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (код проекта МК-5173.2016.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Khludnev A. M. *Thin rigid inclusions with delaminations in elastic plates*. Europ. J. Mech. A Solids. 2012. V. 32. Pp. 69–75.
2. Shcherbakov V. *Shape optimization of rigid inclusions for elastic plates with cracks*. Z. Angew. Math. Phys. 2016. V. 67. Article ID 71.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАХВАТА ДОННОГО МАТЕРИАЛА И НЕНЬЮТОНОВСКОЙ РЕОЛОГИИ НА ДИНАМИКУ ТУРБУЛЕНТНЫХ СКЛОНОВЫХ ПОТОКОВ

М. Э. Эглит¹, А. Е. Якубенко², Т. А. Якубенко²

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

²НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

Доклад посвящен математическому моделированию катастрофических природных потоков, таких как снежные лавины, сели, быстрые оползни. Сведения об их динамических параметрах и границах распространения необходимы для организации защиты объектов в горах. Одним из источников получения таких сведений может быть математическое моделирование. До настоящего времени использовались упрощенные модели, в которых весь поток рассматривался как материальная точка или рассчитывались лишь средние по глубине величины скорости. Здесь формулируется модель склоновых потоков, основанная на полных уравнениях механики сплошных сред и учитывающая следующие три важных фактора: захват потоком слоя материала, по которому он движется; неньютоновские реологические свойства движущегося материала; турбулентный характер движения [1]. Приведены результаты численного исследования влияния этих трех факторов на динамику потоков, движущихся по длинным однородным склонам. Основные выводы следующие. При движении с захватом склонового материала, независимо от реологических свойств потока, скорость и толщина как ламинарных [2,3], так и турбулентных потоков при больших временах растут пропорционально времени, а скорость захвата донного материала стремится к константе, величина которой зависит лишь от угла склона и физических свойств материалов потока и склона. Величины турбулентных напряжений и турбулентной энергии почти всюду уменьшаются со временем; при этом величины их максимальных значений, которые имеют место вблизи дна, остаются неизменными. В потоках неньютоновских жидкостей, захватывающих материал дна, турбулентные характеристики могут иметь в поперечном сечении два локальных максимума - один вблизи дна и второй в центральной части сечения потока. Наличие у движущейся среды предела текучести уменьшает скорость потока и скорость захвата донного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00361, 15-01-08023).

ЛИТЕРАТУРА

1. Эглит М. Э., Якубенко А. Е. *Влияние захвата донного материала и неньютоновской реологии на динамику турбулентных склоновых потоков*. Известия РАН. МЖГ. 2016. № 3. С. 3–15.
2. Eglit M. E., Yakubenko A. E. *Numerical modeling of slope flows entraining bottom material*. Cold Regions Science and Technology. 2014. V. 108. Pp. 139–148.
3. Зайко Ю. С. *Математическое моделирование склоновых потоков с различной реологией*. Известия РАН. МЖГ. 2016. № 4. С. 3–11.

КАРТА СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ОБЛАСТИ ОБРУШЕНИЯ ПОДВЕТРЕННЫХ ВОЛН

С. Н. Яковенко

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

Выполнено численное исследование устойчиво стратифицированного потока с препятствием, генерирующим подветренные волны, которые опрокидываются при определенных условиях. Проведено сканирование сценариев перехода к турбулентности по числам Рейнольдса Re и Прандтля/Шмидта Pr , соответствующим физическим экспериментам и геофизическим течениям. Случай $Re = 4000$ и $Pr = 1$ исследован в [1]. Анализ полей скорости, скаляра и спектров показывает, что имеет место неустойчивость Рэлей–Тейлора (НРТ) в трансверсальном направлении y . С ростом Re и Pr уменьшается длина волны квазидвумерных возмущений НРТ, ускоряется их рост, а также возникают возмущения НРТ в продольном направлении x (рис. 1).

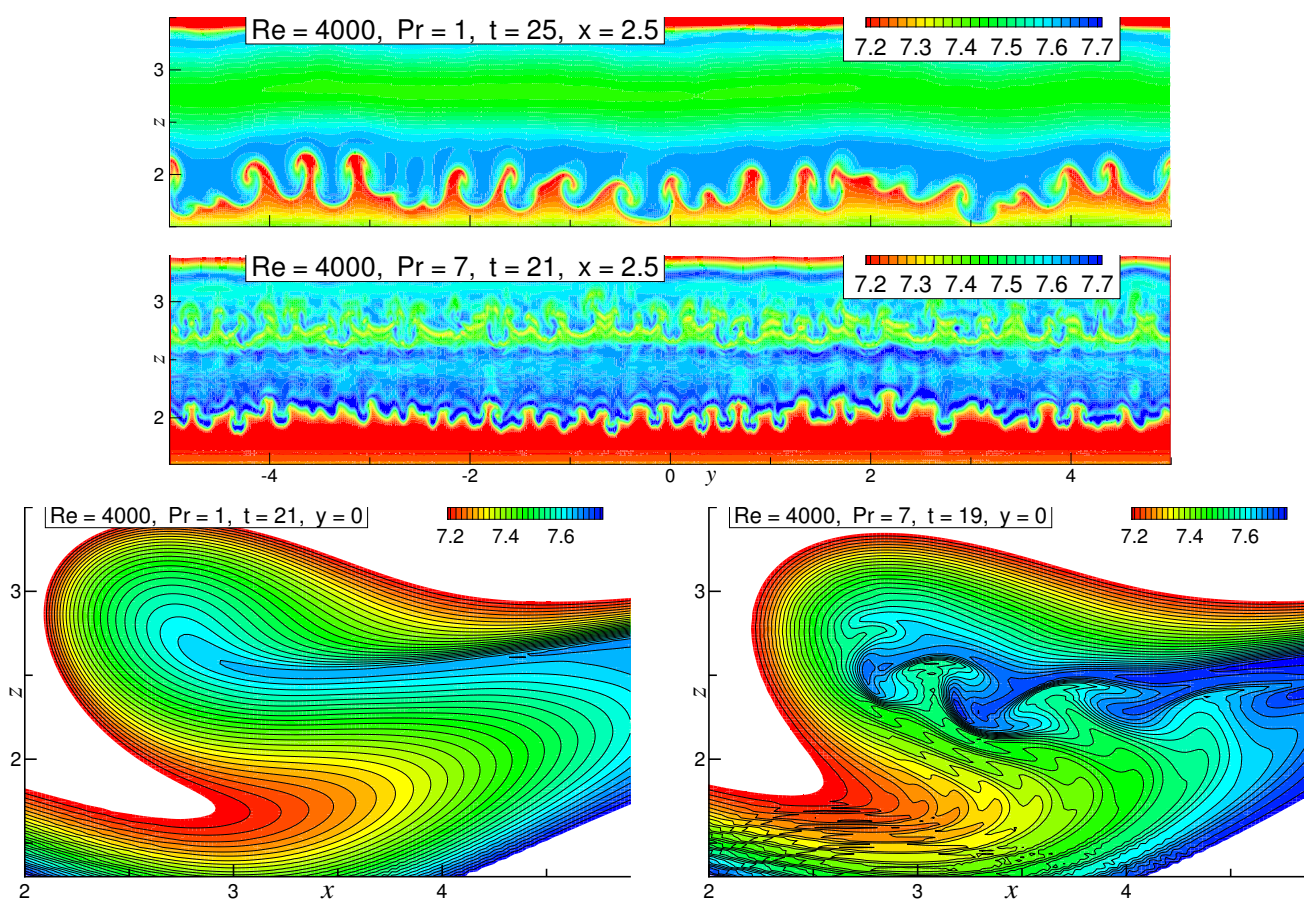


Рис.1. Изолинии плотности в сечениях $x = 2.5$, $y = 0$ — DNS, $Re = 4000$, $Pr = 1$ и 7

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakovenko S. N., Thomas T. G., Castro I. P. *Transition through Rayleigh–Taylor instabilities in a breaking internal lee wave*. J. Fluid Mech. 2014. V. 760. Pp. 466–493.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ СКВОЗЬ УПРУГИЙ ПОРИСТЫЙ СКЕЛЕТ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ГЕМОДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННЫХ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ

А. А. Янченко^{1,2}, Е. И. Роменский³, А. К. Хе^{1,2}, А. П. Чупахин^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

³Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

Артериовенозная мальформация (АВМ) — патологическая связь между венами и артериями в мозге (клубок хаотически переплетенных, перерожденных сосудов), в которой отсутствует капиллярная сеть, вследствие чего осуществляется прямое шунтирование крови из артериального бассейна в венозный. Наиболее часто встречающаяся разновидность АВМ — рацемозная, состоящая из хаотически переплетенных и связанных друг с другом сосудов весьма малого диаметра (0.1 мм и менее). Одним из подходов к моделированию гемодинамики мозга является рассмотрение кровеносного русла в области мелких сосудов как пористого пространства. Для получения системы уравнений течения жидкости в упругой пористой среде применяется метод термодинамически согласованных систем законов сохранения. В общем виде такая система записывается в терминах порождающего термодинамического потенциала и порождающих переменных. При использовании этого подхода все уравнения системы принимают дивергентный вид, она может быть приведена к симметричной форме и является гиперболической при условии выпуклости порождающего потенциала [1], что позволяет применять уже разработанные методы для исследования и моделирования описываемого этой системой процесса.

Построение математической модели церебрального кровообращения основывается на клинических данных, характеризующих течение крови в сосудах головного мозга в норме и при наличии аномалии [2]. Клинические данные позволяют определить физические параметры среды и верифицировать построенные модели.

Для проведения численных расчетов построены вычислительные алгоритмы на основе методов, развитых для гиперболических систем законов сохранения. Основой является метод конечных объемов, для дискретизации по пространству применяется WENO-алгоритм, а для дискретизации по времени — метод Рунге-Кутты.

Разработанная модель позволит более адекватно описывать гемодинамику мозговых сосудов в норме и при аномалии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-31-00223).

ЛИТЕРАТУРА

1. Роменский Е. И. *Термодинамически согласованная система законов сохранения течения сжимаемой жидкости в пористой упругой среде*. Сибирский журнал индустриальной математики. 2011. Т. XIV. № 4(48). С. 86–97.

2. Чупахин А. П., Черевко А. А., Хе А. К., Кривошапкин А. Л. и др. *Измерения и анализ локальной церебральной гемодинамики у больных с сосудистыми мальформациями головного мозга*. Патология кровообращения и кардиохирургия. 2012. Т. 16. № 4. С. 27–31.

ВЛИЯНИЕ САХАРНОГО ДИАБЕТА I ТИПА НА АРХИТЕКТониКУ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА МАЛЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

Г. С. Янькова², А. А. Черевко¹, А. Е. Акулов³, Д. В. Паршин¹

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

²Новосибирский государственный университет

³Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

Кровь осуществляет транспортировку веществ, необходимых для жизнедеятельности, по всему организму. Интересным представляется вопрос о связи какого-либо заболевания и структуры сосудистой системы (в частности, головного мозга).

В работе рассматриваются модели сосудистых сетей головного мозга двух различных генетических линий лабораторных мышей – линия с нокаутом по ФНО и контрольная линия, а также генетическая линия мышей NODSCID с сахарным диабетом I типа.

Одним из эффективных методов исследования строения органов является магнит норезонансная томография (МРТ). Сосудистые сети для нокаутной линии получены в результате обработки данных МРТ-сканирования методом варьирования наклона сканирующей плоскости [1]. Для линии мышей NODSCID был применен метод получения МРТ изображений с использованием объемной протонной радиочастотной катушки.

Для построенных конфигураций проведены гемодинамические расчеты с помощью пакета ANSYS CFX на базе компьютерного центра НГУ, был выполнен статистический анализ параметров кровотока.

На основе данных, полученных в результате статистического и численного анализа результатов расчета, для двух различных генетических линий лабораторных мышей показано отсутствие влияния нокаута по ФНО на морфологические и гидродинамические характеристики Виллизиева круга [2]. Проведенный статистический анализ геометрических и гидродинамических параметров моделей сосудистых сетей для мышей с сахарным диабетом I типа выявил статистически значимые различия в строении подходящих артерий к Виллизиеву кругу.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ №14.W03.31.0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. V. Maltseva, A. A. Cherevko, A. K. Khe, A. E. Akulov, A. A. Savelov, A. A. Tulupov, E. Yu. Derevtsov, M. P. Moshkin, A. P. Chupakhin *Reconstruction of Complex Vasculature by Varying the Slope of the Scan Plane in High-Field Magnetic Resonance Imaging*. Applied Magnetic Resonance. January 5 2016. V. 47. Iss. 1. Pp. 23–39.

2. A. A. Cherevko, G. S. Yankova, S. V. Maltseva, D. V. Parshin, A. E. Akulov, A. K. Khe, A. P. Chupakhin *Construction and investigation of 3D vessels net of the brain according to MRI data using the method of variation of scanning plane*. Journal of Physics: Conference Series. 2016. 722012029.

THE ENERGU METHOD. APPLICATION TO PDES WITH NONSTANDARD GROWTH

S. N. Antontsev¹, S. I. Shmarev²

¹*University of Lisbon, Portugal and Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*University of Oviedo, Spain*

Numerous mathematical models of continuum mechanics involve combined systems of nonlinear PDEs in which different components of the solution, such as velocity, density, pressure, temperature, satisfy equations of different type. These equations may degenerate or become singular at certain values of the solutions or their derivatives which causes localization of solutions in space or time. The typical localization effects are the finite speed of propagation of disturbances from the initial and boundary data, the waiting time phenomenon, extinction or blow-up of solutions in a finite time.

The standard approach to the study of the localization properties consists in comparison with suitable explicit solutions or sub/super solutions of the same equation. However, this approach ceases to be applicable if the explicit solutions are not available, or when the maximum principle fails.

An alternative approach is based on analysis of the local energy functions, which satisfy nonlinear ordinary differential inequalities stemming from the PDE or system of PDEs. This method was proposed and developed in [1, 3, 4].

In the talk we present the basics of the method and offer a review of the results obtained. A special emphasis is made on the application of the method to the study of the so-called PDEs with nonstandard growth, i.e., PDEs with variable and/or anisotropic nonlinearity, and the mathematical models in continuum mechanics involving such equations, where thus far the method of local energies is the only method suitable for the study of the localization properties [2, 5].

This work of the first author was supported by the Research Grant Num. 15-11-20019 of Russian Science Foundation, Russia. The second author acknowledges the support of the Research Grant MTM2013-43671-P, MICINN, Spain.

References

1. Antontsev S. N., Díaz J. I., Shmarev S. I. *Energy Methods for Free Boundary Problems: Applications to Nonlinear PDEs and Fluid Mechanics*. Birkhäuser, 2002.
2. Antontsev S. N., Shmarev S. I. *Evolution PDEs with nonstandard growth conditions*. Atlantis Press. Atlantis Studies in Differential Equations. 2015. V. 4.
3. Antontsev S. N., Shmarev S. I. *On the localization of solutions of doubly nonlinear parabolic equations with nonstandard growth in filtration theory*. *Applicable Analysis*. 2016. V. 95, N. 10. Pp. 2162–2180.

4. Antontsev S.N., Khompysh Kh. *Kelvin-Voight equation with p -Laplacian and damping term: Existence, uniqueness and blow-up*. Mathematical Analysis and Applications. 2017. V.446. Pp. 1255–1273.
5. Antontsev S.N., Shmarev S.I. *Doubly Degenerate Parabolic Equations with Variable Nonlinearity II: Blow-up and Extinction in a Finite Time*. Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications. 2014. V. 95. Pp. 483–498.

HYPERBOLIC MODELS OF BUBBLY FLUIDS: VARIATIONAL APPROACH

N. Favrie, S. Gavriluk, J. Massoni, S. Tkachenko

Aix-Marseille Université, Marseille, France

Physical processes occurring in the continuous media are often described by mathematical models which admit a variational formulation. One of the examples is the dispersive bubbly fluid model. Although dispersive models capture the physics better, some complexities in imposing the boundary conditions are common in the numerical resolution of such systems. One of the ways to avoid these difficulties consists in construction of an approximate hyperbolic model which takes form of the original dispersive model only in some limit. The new model should be unconditionally hyperbolic to make sure that the corresponding Cauchy problem is well-posed. This approach was already implemented in [1] for Serre-Green-Naghdi (SGN) model which describes the dispersive water waves. One has to mention also [2], where a hyperbolic conservative extension of the governing equations was obtained without the variational approach. Like SGN model, the original bubbly fluid equations are Euler-Lagrange equations for some Lagrangian. To construct the new model, the original Lagrangian is replaced by the “augmented” Lagrangian which tends to the original one in some limit.

The new approximate unconditionally hyperbolic model is derived. The Riemann problem is, in particular, numerically solved.

References

1. Favrie N., Gavriluk S. *A robust and rapid numerical method for the dispersive models admitting a Lagrangian : application to Serre-Green-Naghdi equations for long free surface gravity waves (submitted)*. 2016.
2. Liapidevskii V. Y., Gavrilova K. N. *Dispersion and blockage effects in the flow over a sill*. Journal of applied mechanics and technical physics. 2008. V. 49. N 1. P. 14–45.

ON THE CONFORMAL INVARIANCE OF A PROBABILITY MEASURE OF VORTICITY IN 2D TURBULENCE

V. N. Grebenev¹, M. Waclawczyk², M Oberlack^{3,4}

¹ *Institute of Computational Technologies, SD RAS, Novosibirsk, Russia*

² *Institute of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw, Poland*

³ *Chair of Fluid Dynamics, Department of Mechanical Engineering, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany*

⁴ *Graduate School of Computational Engineering, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany*

For decades there have been speculations on the existence of the conformal group (CG) in the statistics of two-dimensional turbulence [1]. Recent investigations of 2D turbulence data employing Schramm-Lowner evolution curves [2] clearly support this conjecture, though a formal prove of existence based on first principles, i.e. only employing Euler and Navier- Stokes equations and any direct consequences there off, has been missing. CG can be understood as a "local scaling" and plays a remarkable role in physics. This is attractive in the two-dimensional case, where the conformal group is infinite-dimensional. So that it allows one to fix many statistical properties, as has been effectively done by physicists in the field theory and theory of critical phenomena. The presence of the conformal invariance would mean that the probability measure of certain quantities (here: vorticity) remains invariant with respect to the conformal transformation. Presently we have proven based on the Lundgren, Monin and Novikov (LMN) equations for multipoint pdf's of vorticity that the conjecture is true indeed for 2D case, i.e. the one-point probability measure of the vorticity is conformally invariant. We considered LMN system in the form suggested by Friedrich et al. in [3]. Each n -th equation contains an unclosed term with $n + 1$ -point pdf, such, that the infinite number of equations is needed to attain full statistical description of turbulence. We find symmetry transformations of the first equation in this chain using the Lie group analysis methods for integro-differential equations. We obtain an exact analytic results which shows that this equation and the corresponding 1-point probability measure are conformally invariant. Hence, we show analytically that CG can appear in 2D statistical hydrodynamics.

VNG is partially supported by Grant Scientific Schools 7214.2016.9.

References

1. Polyakov A.M. *The theory of turbulence in two dimensions*. Nuclear Phys. B 1993. V. 396. N 2–3. Pp. 367–385.
2. Bernard D., Boffetta G., Celani A. and Falkovich G. *Conformal invariance in two-dimensional turbulence*. Nature Physics. 2006 V. 2. N2. Pp. 124–128.
3. Friedrich R., Daitche A., Kamps O. , Lülff J., Voßkuhle M. and Wilczek M. *The Lundgren-Monin-Novikov hierarchy: Kinetic equations for turbulence*. C. R. Physique. 2006. V. 13. Pp. 929–953.

GROUP CLASSIFICATION OF THE BOLTZMANN EQUATION WITH A SOURCE FUNCTION

Yu. N. Grigoriev¹, A. Karnbanjong², S. V. Meleshko², A. Suriyawichitseranee²

¹*Institute of Computational Technology SB RAS, Novosibirsk*

²*Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand*

The research is related with application of the group analysis method to the Boltzmann equation with a source term

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f - J(f, f) = q.$$

New results obtained for the Fourier image of the spatially homogeneous and isotropic Boltzmann equation with a source

$$\varphi_t + \varphi(0, t)\varphi - \int_0^1 \varphi(xs)\varphi(x(1-s)) ds = g,$$

will be also presented.

ON APRIORY ESTIMATES FOR SOLUTIONS TO THE STEADY NAVIER–STOKES SYSTEM

M. V. Korobkov

Sobolev Inst. of Mathematics, Novosibirsk

The talk is base on the joint work with coauthors of [1].

Consider the steady Navier–Stokes equations

$$\begin{cases} -\nu\Delta\mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} & \text{in } \Omega, \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 & \text{in } \Omega, \\ \mathbf{u} = \mathbf{a} & \text{on } \partial\Omega \end{cases} \quad (1)$$

in the plane bounded domain $\Omega \subset \mathbb{R}^2$, with C^2 -smooth boundary $\partial\Omega = \cup_{j=0}^N \Gamma_j$ consisting of $N + 1$ disjoint components Γ_j , $j = 0, \dots, N$. In (1) $\nu > 0$ is the viscosity coefficient, \mathbf{u} , p are the (unknown) velocity and pressure fields, \mathbf{a} is the (assigned) boundary data, and \mathbf{f} is the body force density.

Using the methods of paper [1], we have proved that for any $\mathbf{f} \in L_2(\Omega)$ and $\mathbf{a} \in W^{1/2,2}(\Omega)$ with $\int_{\partial\Omega} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} dS = 0$ there exists a solution $\mathbf{u} \in W_2^1(\Omega)$ to a system (1) such that

$$\|\nabla\mathbf{u}\|_{L_2(\Omega)} \leq C\|\mathbf{f}\|_{L_2(\Omega)} + C_*(\|\mathbf{a}\|_{W^{1/2,2}(\Omega)}),$$

where the function $C_*(\cdot)$ satisfies the asymptotic condition $C_*(t) \leq Ct$ for $t \rightarrow 0$. The behavior of $C_*(t)$ for large t is an open question.

The research was partially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 14.Z50.31.0037).

References

1. M.V. Korobkov, K. Pileckas and R. Russo. *Solution of Leray’s problem for stationary Navier–Stokes equations in plane and axially symmetric spatial domains*. Annals of Math. 2015. V. 181. Iss. 2. Pp. 769–807. <http://dx.doi.org/10.4007/annals.2015.181.2.7>

Предметный указатель

Antontsev S. N., 289
Favrie N., 290
Gavrilyuk S., 290
Grebenev V. N., 291
Grigoriev Yu. N., 292
Karnbanjong A., 292
Kmit I. Y., 168
Korobkov M. V., 292
Massoni J., 290
Meleshko S. V., 292
Oberlack M., 291
Shmarev S. I., 289
Suriyawichitseranee A., 292
Tkachenko S., 290
Wacławczyk M., 291

А

Абашев В. М., 18
Абдулин И. М., 270
Абдуракипов С. С., 19
Абенов М. М., 20
Адищев В. В., 21
Акинъшин Р. В., 144
Аксенов А. В., 22
Актершев С. П., 23
Акулов А. Е., 288
Алабужев А. А., 24, 25, 131
Алексеев Г. В., 26
Алексеев С. В., 23
Алехин В. В., 146
Алымов М. И., 253
Амиров Р. Х., 275
Амосова Е. В., 27
Андреев В. К., 28
Андреев С. Г., 28
Анисимов А. Г., 170, 278
Анисичкин В. Ф., 29
Аракчеев А. С., 30
Архипов Д. Г., 31
Аульченко С. М., 73
Афанасьева С. А., 123
Афонин А. Г., 32
Ахметшин Р. М., 28

Б

Бабичев А. В., 146
Бабкин А. В., 221
Байкин А. Н., 33
Байков Н. Д., 207
Банщикова И. А., 34, 35, 124
Баранникова Д. Д., 189
Баскаков В. Д., 113
Батищев В. А., 36
Батраев И. С., 104, 282
Батуев С. П., 37
Баутин С. П., 37
Баутин С. П., 39
Башарин А. Ю., 40
Бедарев И. А., 41
Бекежанова В. Б., 42, 43
Бекибаев Т. Т., 109
Белов Н. Н., 123
Белова О. Н., 44
Белоусова О. Е., 270
Белых В. Н., 45
Бельмецев Н. Ф., 272
Беляев В. А., 46
Бердников В. С., 47–49
Бибердорф Э. А., 50
Блинов В. А., 161
Блохин А. М., 50–52
Боган Ю. А., 53
Богданов А. Н., 54
Бойко А. В., 55, 120
Бойко В. М., 214
Бойко М. М., 28
Болеста А. В., 56
Борд Е. Е., 57
Борзенко Е. И., 58, 59
Борисов С. П., 60
Боронин С. А., 61
Бочаров О. Б., 121
Бризицкий Р. В., 62, 63, 230
Бродова И. Г., 64
Будадин О. Н., 65
Буркин В. В., 123
Бутов В. Г., 32, 242
Быковский Ф. А., 66

В

Валов А. В., 138
 Вандамм М., 188
 Вановский В. В., 67
 Васильев А. А., 68, 263
 Веденеев В. В., 69, 120
 Ведерников Е. Ф., 66
 Веретенников В. А., 253
 Винокуров В. А., 48
 Винокуров В. В., 48
 Власова С. С., 70
 Воеводин А. Ф., 71
 Волков Р. Е., 190
 Волчков Ю. М., 72
 Воронин М. С., 72
 Востриков В. И., 257
 Вячкин Е. С., 73, 75
 Вячкина Е. А., 75

Г

Гаврилов Н. В., 76
 Гаврилюк С. Л., 76
 Гаджиев Д. А., 77
 Гайфуллин А. М., 77, 78
 Георгиевский П. Ю., 80
 Георгиевский П. Ю., 79
 Герасимов А. В., 81
 Гетман В. А., 36
 Гилев С. Д., 82
 Гилева А. Е., 65
 Говердовский В. Н., 83
 Голдобин Д. С., 175
 Головин С. В., 33
 Головнев И. Ф., 84
 Головнева Е. И., 84
 Гологуш Т. С., 85, 195
 Голушко С. К., 86, 87
 Голых Р. Н., 88, 89
 Гомонова О. В., 234
 Гончарова О. Н., 42, 43
 Гордеев В. В., 90
 Гордеева В. Ю., 91
 Горев Б. В., 159
 Гороженинова Т. Н., 92
 Грачева М. С., 21
 Грешилов А. Г., 93
 Григорьев Ю. М., 94
 Григорьев Ю. Н., 95

Гришков В. А., 48
 Грязнов Е. Ф., 28, 96
 Губаев К. В., 276

Д

Дементьев А. А., 184
 Демешкин А. Г., 130, 155
 Демьянко К. В., 96
 Денисенко Д. С., 97
 Денисенко Н. С., 98
 Дерош Ж., 61
 Дерябин С. Л., 37
 Диесперов В. Н., 54
 Дмитриев Э. А., 232
 Добросельский К. Г., 99
 Доброхотов С. Ю., 100, 101
 Довгаль А. В., 102
 Дождиков В. С., 40
 Долгих А. В., 199
 Долгих В. С., 103
 Долголева Г. В., 104
 Дородников А. Н., 152
 Дудина Д. В., 104, 170
 Дулин В. М., 19
 Думбсер М., 210
 Дьякова О. А., 59

Е

Евстигнеев А. И., 232
 Егитов А. В., 105
 Егоров И. Е., 106, 107
 Еремина Г. М., 239
 Еремкин И. В., 18
 Ершов А. П., 107, 231
 Ершов И. В., 95
 Есиков М. А., 170
 Ефимова Е. С., 107

Ж

Жалнина А. А., 157
 Жапбасбаев У. У., 109
 Жвик В. В., 78
 Ждан С. А., 66, 227
 Животов Н. П., 18
 Жук В. И., 54
 Журавлева Е. Н., 129
 Журавская Т. А., 160

З

Загидулин А. Р., 110
Зайко Ю. С., 69, 225
Зайковский В. Н., 134
Замураев В. П., 18, 111, 112
Занин Б. Ю., 102
Зарубина О. В., 113
Захарова Ю. В., 114
Захарченко К. В., 115, 128, 159, 220
Зелепугин А. С., 116, 202
Зелепугин С. А., 116, 202
Злобин Б. С., 117, 246
Зубарева А. Н., 118
Зубцов А. В., 77
Зыкова А. И., 104
Зюзина Н. А., 119

И

Иванов О. О., 120
Иванов П. П., 275
Иванова О. В., 116
Игнатенко Я. С., 121
Исаенков С. В., 122
Ищенко А. Н., 123
Иявойнен С. В., 124

К

Казаков А. Л., 125, 126
Казанцев С. Г., 127
Казачинский А. О., 148
Казутин М. В., 90
Каледин В. О., 65, 73
Калинина А. П., 18, 111, 112
Капранов Ю. И., 128
Капустин В. И., 128, 159
Карабут Е. А., 129
Карнаухов К. А., 113
Карпов Е. В., 130
Кашина М. А., 25, 131
Кириловский С. В., 55, 132, 182, 213, 224, 268
Кирюшкин А. Е., 132
Киселев В. В., 117
Киселев В. П., 133, 134
Киселев С. П., 133, 134
Киченко А. А., 92
Клименко Л. С., 135
Кльшин В. В., 199
Князева А. Г., 147, 149, 273

Коврижных А. М., 136
Коврижных С. А., 136
Ковыркина О. А., 137
Кожевникова М. Е., 138
Козельская С. О., 65
Козлов И. И., 139
Козырев Н. В., 90
Колмакова Т. В., 140
Колпаков В. И., 28
Кондрин А. В., 235
Коноваленко И. С., 141
Константинов А. П., 83, 142
Копьев В. Ф., 143, 144
Кореньков В. В., 113
Корнев В. М., 145
Коробейников С. Н., 146, 225
Коробкин А. А., 280
Коростелева Е. Н., 147
Корсакова Н. К., 205
Крайнов А. Ю., 215
Крайнов Д. А., 184
Красинский Д. В., 277
Красников И. Ю., 199
Крат Ю. Г., 147
Крутова И. Ю., 37, 148
Крюкова О. Н., 149
Кудрявцев А. Н., 60, 150, 266
Кузнецов И. В., 151
Кузнецов П. А., 125
Кузьмин Е. В., 152
Кузьмин К. А., 223
Кузьмин С. В., 152
Кулик В. М., 98, 120
Куликов И. М., 153
Куликовский А. Г., 154
Кургузов В. Д., 155
Курзин В. Б., 156
Кучер Н. А., 157
Кучеренко И. В., 21
Куянова Ю. О., 201

Л

Лаврук С. А., 261
Ладов С. В., 158, 221
Лазарева Г. Г., 30
Ларичкин А. Ю., 159, 161, 220, 283
Левин В. А., 79, 80, 160
Леган М. А., 124, 161, 162

Лемперт А. А., 125
 Литвинов И. В., 191
 Лобанов А. В., 163
 Лотов В. В., 214
 Луценко Н. А., 164, 165
 Лысак В. И., 152
 Любанова А. Ш., 166
 Любашевская И. В., 35, 124
 Любимова О. Н., 167
 Люлько Н. А., 168
 Люшнин А. В., 91
 Ляпидевский В. Ю., 76

М

Маевский К. К., 169
 Макаренко Н. И., 97
 Максимова А. Г., 30
 Максимовский Е. А., 115, 159
 Мали В. И., 170, 278
 Мамонтов А. Е., 171
 Марков В. Г., 172
 Марков П. В., 173
 Маркович Д. М., 122
 Марышев Б. С., 135, 174, 175
 Маслов А. Л., 149
 Матвеев К. А., 192
 Меграбов А. Г., 176
 Мей Р., 121
 Мелешко С. В., 178
 Мержиевский Л. А., 84
 Местникова А. А., 179
 Мещеряков Ю. П., 246
 Миккельсен Р. Ф., 191
 Микушина В. А., 180
 Миньков Л. Л., 132
 Миренков В. Е., 181
 Миронов С. Г., 182, 213
 Миронова Е. А., 183
 Митин К. А., 47–49
 Моисеева К. М., 184
 Морковин А. В., 167
 Мочалова В. М., 28, 185, 258
 Мошкин Н. П., 178

Н

Надкриничный Л. В., 186
 Назайкинский В. Е., 187
 Назаров Л. А., 188

Назарова Л. А., 188
 Наймарк О. Б., 64
 Наумов И. В., 191
 Немолочнов Д. А., 278
 Нестеров А. Ю., 214
 Нечепуренко Ю. М., 55
 Никитина Е. В., 28
 Никифоровская В. С., 71
 Никольская Я. М., 158
 Новаковский Н. С., 39
 Новоселов А. Н., 161, 162
 Носов Г. В., 32
 Носова М. Г., 32

О

Обухов А. Г., 37, 189, 190
 Овчаренко В. Е., 141
 Огнева Т. С., 278
 Одинокоев В. И., 232
 Окулов В. Л., 191
 Опрышко О. В., 148
 Орлов К. Ю., 57
 Орлов М. Ю., 116
 Орлов С. А., 192
 Орлов Св. С., 126
 Осипцов А. А., 61, 193
 Остапенко В. В., 85, 119, 137, 194, 195
 Остросаблин Н. И., 196
 Очеретяный С. А., 139

П

Палымский В. И., 197, 198
 Палымский И. Б., 197, 198
 Пальчиков Е. И., 199
 Панарин В. А., 57
 Папин А. А., 200
 Паршин Д. В., 201, 288
 Пахнутова Н. В., 202
 Пахомов М. А., 203
 Пашков С. В., 81
 Пекшева А. А., 204
 Пеньковский В. И., 205
 Перейра Ж.-М., 188
 Перепелица Б. В., 206
 Петренко И. А., 85
 Петров А. Г., 67, 207–209
 Петров Е. В., 253
 Петрова А. Г., 178

Петрова А. Н., 64
 Пешков И. М., 210
 Пластинин А. В., 231
 Плехов О. А., 64
 Погудалина С. В., 211
 Подружин Е. Г., 110
 Подрябинкин Е. В., 276
 Поливанов П. А., 212
 Поплавская Т. В., 55, 132, 182, 213, 224, 268
 Поплавский С. В., 214
 Попов С. В., 172
 Порязов В. А., 215
 Потапов И. И., 147, 208
 Прокофьев В. В., 139, 249
 Прокудин Д. А., 171
 Просвиряков Е. Ю., 70, 216, 217
 Протасов В. А., 153
 Прохоров Е. С., 218
 Прууэл Э. Р., 29, 107
 Псахье С. Г., 141
 Пухначев В. В., 178

Р

Радченко А. В., 37
 Радченко П. А., 37, 219
 Раевская Г. А., 220
 Разоренов С. В., 64
 Рамазанова Г. И., 109
 Рассоха С. С., 221
 Расторгуев Г. И., 110
 Резанова Е. В., 222
 Резников Б. С., 223
 Решетникова Е. В., 73
 Решетова А. И., 224
 Решмин А. И., 225
 Рикун Ю. А., 140
 Рогаев К. С., 123
 Роменский Е. И., 210, 287
 Ротанова Т. А., 138, 225
 Рубцов И. А., 107
 Рудой Е. М., 226
 Рыбин Д. К., 104, 282
 Рыбников А. И., 227
 Рыльцева К. Е., 58
 Рябчун А. М., 199

С

Савостьянова И. Л., 235

Савченко А. В., 181
 Саженов С. А., 151
 Самойлова Х. В., 228
 Самсонов А. Н., 228
 Сандуляну Ш. В., 229
 Сарицкая Ж. Ю., 63, 230
 Сатонкина Н. П., 231
 Свешникова Е. И., 154
 Свиридов А. В., 232
 Семенко Е. В., 233
 Семенко Р. Е., 51
 Семенко Т. И., 233
 Семенов В. Н., 257
 Семисалов Б. В., 51, 87
 Сенашов С. И., 234, 235
 Сенницкий В. Л., 236
 Сибин А. Н., 237
 Сидоренко А. А., 212
 Сидоренко Ю. Н., 180
 Симонов Е. В., 227
 Синяев С. В., 32, 242
 Смеликов В. Г., 237
 Смолин А. Ю., 239
 Смолин И. Ю., 180, 239
 Смолина И. Ю., 239
 Собачкина Н. Л., 240
 Солоненко В. А., 32
 Сорокин А. М., 102
 Сосиков В. А., 118
 Сосырский А. Б., 123
 Спевак Л. Ф., 126
 Спивак Ю. Э., 241
 Станкевич С. В., 242
 Старовойтов В. Н., 179, 243
 Старовойтова Б. Н., 243
 Степанова И. В., 244
 Степанова Л. В., 44, 103, 183, 204, 245
 Стояновский О. И., 246
 Стурова И. В., 247
 Сударикова А. Д., 225
 Сутырин О. Г., 80
 Сухинин С. В., 83, 93, 142, 248

Т

Табаченко А. Н., 123
 Такмазьян А. К., 249
 Таланин А. В., 115
 Талышев А. А., 250

Тепловодский С. Х., 225
 Терехов В. И., 203
 Терешко Д. А., 251
 Тихонова И. М., 107
 Ткачев Д. Л., 52
 Ткачева Л. А., 247
 Токарева М. А., 200
 Толкачев В. Ф., 116
 Толченников А. А., 101
 Третьяков П. К., 18
 Трилис А. В., 83, 252
 Трифанов А. В., 197
 Тропин Д. А., 260
 Трофимов В. С., 253
 Троцюк А. В., 255, 263
 Тушкин А. В., 18
 Туркова В. А., 103, 256

У

Ульяницкий В. Ю., 104, 282
 Усольцева О. М., 257
 Уткин А. В., 28, 118, 185, 258

Ф

Фанкина И. В., 259
 Федоров А. В., 114
 Федоров А. В., 41, 211, 260, 261
 Федоров В. Е., 261
 Федоров С. В., 158
 Федорова Н. В., 162
 Федорова Н. Н., 114, 211
 Фецов С. С., 165
 Филатов Е. В., 249, 262
 Филимонова Е. А., 275
 Фомин В. М., 56
 Фомин П. А., 197, 198, 255, 263
 Фролов И. В., 198
 Фролов О. Ю., 58

Х

Хабахпашев Г. А., 31
 Хабахпашева Т. И., 280
 Харьков Н. С., 263
 Хе А. К., 57, 287
 Хегай Е. И., 264
 Хлуднев А. М., 265
 Хмель Т. А., 261, 265
 Хоменок И. П., 267

Хотяновский Д. В., 150, 266
 Хребтов М. Ю., 19
 Христенко Ю. Ф., 81, 202

Ц

Цой П. А., 257, 267
 Цырюльников И. С., 224, 268

Ч

Чанышев А. И., 269, 270
 Чепуров А. И., 49
 Черданцев А. В., 122
 Черданцев М. В., 122
 Черевко А. А., 57, 85, 98, 195, 288
 Черемных Е. Н., 28
 Черных И. Г., 153
 Чернышев С. А., 144
 Чесноков А. А., 76
 Чиркунов Ю. А., 271, 272
 Чичиндаев Г. А., 273
 Чумаков Ю. А., 273
 Чупахин А. П., 57, 98, 274, 287

Ш

Шавелкина М. Б., 275
 Шапеев А. В., 276
 Шарыпов О. В., 277
 Швецов Г. А., 32
 Швецов Г. А., 242
 Шевцова Л. И., 278
 Шелухин В. В., 279
 Шемелин С. Д., 117
 Шилько Е. В., 141
 Шишмарев К. А., 280
 Шмидт А. В., 281
 Шорохов Е. В., 64
 Шрагер Г. Р., 58
 Штерцер А. А., 117, 246, 282
 Шутов А. В., 283
 Шутов В. А., 283

Щ

Щербаков В. В., 226, 284

Э

Эглит М. Э., 285

Ю

Югов Н. Т., 123

Юдин М. А., 144, 209
Юношев А. С., 116, 231
Юрковский В. С., 83

Я

Якимов А. Ю., 249, 262
Яковенко С. Н., 286
Якубенко А. Е., 285
Якубенко Т. А., 285
Янченко А. А., 274, 287
Янькова Г. С., 288

Подписано в печать 04.08.2017.	Формат 60×84 1/8.	Офсетная печать.
Усл. печ. л. 30,4.	Уч.-изд. л. 32,0.	Тираж 300 экз.
		Заказ № 223.

Лицензия ПД N 12-0143 от 22.10.2001
Отпечатано на полиграфическом участке
Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск, проспект акад. Лаврентьева, 15.