Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Механико-математический факультет МГУ
НИИ механики МГУ

ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Научная конференция

Секция механики

17–26 апреля 2017 года

Тезисы докладов

Издательство Московского университета
2017

УДК 531/534
ББК 22.2
Л75

Печатается по решению Ученого Совета НИИ механики МГУ
и постановлению Редакционно-издательского совета
механико-математического факультета МГУ

Ломоносовские чтения. Научная конференция. Секция механики.
Л75 17–26 апреля 2017 года. Тезисы докладов. – М.: Издательство
Московского университета, 2017. – 205 с.

ISBN 978-518-011226-9

СБОРНИК ВКЛЮЧАЕТ ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ПО СОВРЕМЕННЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ МЕХАНИКИ И РЯДУ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ПРОБЛЕМ

УДК 531/534
ББК 22.2

РАБОЧАЯ ГРУППА

С.В. Гувернюк, Е.В. Заплетина, М.Ю. Рязанцева, Т.А. Якубенко

Тезисы докладов напечатаны с оригиналов, представленных авторами.

ISBN 978-518-011226-9 © Московский государственный университет, 2017.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Агеев А.И., Азанов Г.М., Голубкина И.В. Численное моделирование течения вязкой жидкости в узком канале с супергидрофобной стенкой……... 19
Азанов Г.М., Осипцов А.Н. Течение газокапельной смеси в высокоскоростном пограничном слое……. 20
Аксенов А.В. Построение функции Римана уравнения одномерной газовой динамики…… 21
Александров Д.Е. Сложность распознавания слова и его искажений в потоке данных…… 21
Алексюк А.И., Шкадов В.Я. Рост и затухание трехмерных вихревых структур в ближнем следе за цилиндром…….. 22
Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынников Я.А., Дынникова Г.Я. Моделирование аэроупругих колебаний эллиптического профиля в вязкой жидкости…… 22
Арафайлов С.И. Взаимодействие маховской конфигурации отражения ударной волны от плоской поверхности с неровностями……. 23
Арутюнян А.М., Федотенков Г.В. Исследование распространения нестационарных возмущений в полупространстве с заглубленной цилиндрической полостью методом граничных элементов……. 24
Асмолов Е.С., Виноградова О.И., Низкая Т.В. Гидродинамическая дисперсия частиц в канале с анизотропными супергидрофобными стенками…… 25
Афанасьев А.А., Мельник О.Э. Численное моделирование формирования линзы концентрированного рассола при дегазации магматического очага……... 25
Афонин С.А., Богомолов И.И., Сильниченко И.В. Выявление путей распространения информации в социальных сетях на примере сети Twitter…… 26
Ахметгалеев А.Ф., Овчинникова Н.В. Задача о свободной выдувке купола из упругопластического материала…… 27
Бабаева Д.О., Молодцов И.Н. О гипотезе локальной простоты теории упругопластических процессов…….. 28
Бакланов Ф.Ю., Морозов В.М. О связи между фильтром Калмана и наблюдаемостью в линейных нестационарных системах. 28
Балуев А.А., Заплетин М.П. Построение индекса на множестве товаров……... 29
Белова Д.Ю., Никитин В.Ф. Моделирование термогазового воздействия при вытеснении нефти…… 29
Белоглазкин А.Н., Шкадов В.Я. Применение интегральных соотношений В.В. Голубева к исследованию волновых течений пленок…… 30

Беляев А.П., Белякова Т.А., Зезин Ю.П., Инюхин А.В., Костырева Л.А., Моссаковский П.А., Чистяков П.В. Разработка и верификация редуцированных математических моделей динамического нагружения тканых композитов……..... 31
Беляев Н.А., Леонтьев Н.Е. Медленные безнапорные течения жидкости внутри высокопористой среды…….. 31
Богданов А.Н. К моделированию трансзвукового перехода в каналах типа сопла Лаваля……... 32
Боголепов В.В., Ермолаев И.К., Сухановская Л.Д. Экспериментальные исследования возможности отрыва пограничного слоя за счет создания интенсивного тепловыделения на поверхности тела вращения…… 32
Бойко А.В., Зуев В.В. О динамических воздействиях на систему «имплантат – костная ткань»……... 33
Бойков В.Г., Гаганов И.В., Левин В.Ан., Юдаков А.А. О реализации метода Крейга – Бэмптона для моделирования движения механической системы, состоящей из деформируемых упругих тел…… 34
Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. О достижимой точности и некоторых подходах к векторной аэрогравиметрии…….. 34
Бондарев В.О., Веденеев В.В. Влияние возмущений пограничного слоя на флаттер упругих пластин при малых сверхзвуковых скоростях……. 35
Боронин С.А. О влиянии рассогласования скоростей фаз на гидродинамическую устойчивость дисперсных потоков…… 36
Бровко Г.Л. О подходах к построению новых тензорных мер деформаций и напряжений…….. 37
Бровко Г.Л., Иванова О.А. Модель оснащенного стержня с вязкоупругими внутренними взаимодействиями……... 38
Бровко Г.Л., Фасхеев И.О. Механические процессы в пористых наполненных средах при малых и конечных деформациях каркаса.. 38
Бровченко Д.А., Карапетян А.В. О стационарных движениях системы шарнирно связанных волчков Лагранжа…… 38
Брыкина И.Г. Формулы для тепловых потоков к поверхности пространственных затупленных тел……... 39
Брыкина И.Г., Тирский Г.А. Аналитическое моделирование световой кривой Челябинского болида…….. 39
Брюханов И.А. Исследование релаксации сдвиговых напряжений в сплавах алюминия с медью на основе молекулярно-динамических расчетов…… 40
Бугров Д.И., Формальский А.М. Особенности границ областей достижимости в системах третьего порядка…….. 41
Быкова Н.Г., Гочелашвили К.С., Забелинский И.Е., Карфидов Д.М., Макаренко Г.Ф., Сенаторов А.К.,

Сергейчев К.Ф., Шаталов О.П. Экспериментальное исследование прозрачности воздушной плазмы для лазерного излучения на длине волны 1,55 мкм…… 41
Вакулюк В.В. Варианты применения теории вязкоупругости в биомеханике……... 42
Варламова И.А., Заплетин М.П. Алгоритм обеспечения планирования съемки заданных участков поверхности Земли космическим аппаратом……... 43
Васенин В.А. Перспективы развития ИАС «ИСТИНА» в свете задач по подготовке информации для принятия управленческих решений в сфере организации научных исследований и образовательного процесса……... 44
Васин Р.А. О зависимости поверхности нагружения от скорости пластической деформации……... 46
Васин Р.А. О некоторых вариантах определяющих соотношений, описывающих горячее деформирование сплавов с учетом эволюции их структуры……... 46
Васюкова О.Э., Самсонов В.А. Подход к идентификации коэффициентов трения в шарнире управляемого физического маятника по амплитудам установившихся колебаний……. 47
Вахтерова Я.А., Федотенков Г.В. Обратная задача о восстановлении нестационарной нагрузки, воздействующей на балку Тимошенко……. 47
Вдовиченко И.И., Зингерман К.М., Левин В.Ан., Яковлев М.Я. Вариант оценки эффективных механических и теплофизических характеристик композиционных материалов и его реализация в пакете Фидесис…….. 48
Вершинин А.В., Левин В.Ан., Лукьянчиков И.С., Сбойчаков А.М., Яковлев М.Я. Об одном подходе к численной оценке эффективных упругих характеристик предварительно нагруженного неоднородного материала при конечных деформациях……. 49
Вершинин А.В., Левин В.Ан., Мясников А.В., Сабитов Д.И., Сбойчаков А.М. О связанных гидрогеомеханических моделях сланцевых формаций…… 49
Вершинин А.В., Левин В.Ан., Мясников А.В., Сбойчаков А.М. Вариант обобщения геомеханической модели эффективных свойств трещиноватых резервуаров…….. 50
Вершинин А.В., Левин В.Ан., Петровский К.А. О применении метода спектральных элементов для моделирования тонкостенных конструкций при конечных деформациях и промышленная реализация в пакете «Фидесис»…….. 51
Вигдорович И.И. Законы стенки для скорости и температуры в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое……... 51

Виноградов Ю.А., Попович С.С., Стронгин М.М. Определение в эксперименте коэффициентов теплоотдачи и восстановления температуры при течении сжимаемого газа…….. 52
Виноградова А.С., Налетова В.А., Турков В.А. Влияние смачивания на форму магнитной жидкости между соосными коническими и цилиндрической поверхностями в магнитном поле линейного проводника при наличии перепада давления…….. 53
Виноградова О.А., Карапетян А.В. О движении шайбы на вращающейся плоскости……. 54
Водопьянов И.С., Даржания И.И., Синявин А.А. Дозвуковое отрывное обтекание удлиненных цилиндров различного поперечного сечения, физическое моделирование и управление…... 54
Водянова В.В., Заплетин М.П., Минченков М.А. Многомерная аппроксимация МВЗ-индекса устойчивости на множестве биржевых товаров……... 55
Галатенко А.В., Артемов А.А. Применение мем-грамм-модели для изучения динамики изменений содержания информационного пространства социума…… 56
Галатенко А.В., Казаков И.Б. Об одном способе помехоустойчивого кодирования скрытых каналов передачи информации……... 57
Георгиевский Д.В. Об устойчивости плоскопараллельных нестационарных жесткопластических течений в слое…….. 58
Георгиевский П.Ю., Левин В.А. О влиянии локализованного энерговклада на сверхзвуковое обтекание тел при различных числах Маха набегающего потока…….. 58
Георгиевский П.Ю., Максимов А.Н. Об особенностях маховского отражения при дифракции ударной волны на клине…… 59
Герасимов К.В., Зобова А.А., Косенко И.И. Движение симметричного экипажа с массивными роликами на омни-колесах…… 60
Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. Формирование плазменных струй и многоканальных режимов протекания тока с помощью разрядных систем с высоким тепловым сопротивлением электродов……. 61
Головин А.М. К теории броуновского движения……. 62
Головин А.П., Глинов А.П. Развитие экспериментальной базы на установке П2000 и некоторые результаты по устойчивости протяженных дуговых разрядов…….. 62
Голосная М.Н., Пичугина Д.А., Кузьменко Н.Е. Строение и каталитические свойства кластеров золота, содержащих фосфиновые лиганды……... 63
Голуб А.П., Селюцкий Ю.Д. Качественный анализ динамики двухзвенного флюгера……. 64

Голубев Ю.Ф., Мелкумова Е.В. Особенности структуры допустимых областей точек опоры двуногого робота на наклонном цилиндре…… 64
Голубятников А.Н. Слабые релятивистские ударные волны на переменном фоне……. 65
Голубятников А.Н., Иванов О.О. Статистическая физика системы плавящихся частиц…… 66
Голубятников А.Н., Любошиц Д.Б. Точные решения уравнений релятивистской гидродинамики со сферической волной аннигиляции…….. 67
Горбачев В.И. Об учете скорости изменения температуры в уравнениях связанной задачи термоупругости……... 67
Горбачев В.И., Кабанова Л.А. О постановках задач в теориях пластин Кирхгофа – Лява, Тимошенко и Рейснера……... 68
Горбачев В.И., Корсаков А.А. Тепловой удар по торцу неоднородного стержня с переменным сечением……. 68
Горбачев В.И., Мельник Т.М. О постановках задач в теориях стержней Бернулли – Эйлера, Тимошенко и Рейснера……. 68
Горбачев В.И., Назарова Е.Ю. Тепловой удар по неоднородному по глубине полупространству……. 69
Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И. Численное и экспериментальное моделирование теплообмена в недорасширенных струях азота в ВЧ-плазмотроне……... 69
Горохова Н.В. Формирование вулканических молний……. 70
Горячев В.Д., Рыбакин Б.П., Стамов Л.И., Смирнов Н.Н. Формирование протозвезд, возникающих при взаимодействии ударных волн с молекулярными облаками…… 71
Горячева И.Г., Тюрин И.В. Моделирование контактного взаимодействия упругого слоя со штампом, обладающим поверхностным рельефом…… 72
Григорьев И.С., Заплетин М.П., Самохин А.С., Самохина М.А. Построение оптимальных межпланетных перелетов с многовитковым торможением малой тягой……... 72
Григорьев И.С., Проскуряков А.И. Оптимизация перелета КА с низкой круговой орбиты ИСЗ со сбросом отработанных ступеней в атмосферу……... 73
Гринь Ю.И. О модернизации системы управления экспериментальной установки НИИ механики МГУ «Ударная труба «Квадрат»…… 74
Гурьев К.П., Звягин А.В. Нестационарное воздействие движущейся нагрузки на пористое полупространство……. 74
Давыдов С.А., Земсков А.В. Анализ нестационарных термодиффузионных процессов в многокомпонентной упругой среде……... 75

Джалалова М.В., Степанов А.Г. Численное исследование НДС тканей зубочелюстного сегмента в окрестности эндодонто-эндооссального имплантата……. 75
Дзабраев М.Д. Методы автоматического извлечения текстового содержимого Интернет-сайтов для их последующими классификации и анализа……. 76
Доронин Р.А, Заплетин М.П. Оптимизация перелета космического аппарата между двумя эллиптическими орбитами…... 77
Досаев М.З. Колебания тормозной колодки…….. 78
Дьяков П.А., Малашин А.А., Смирнов Н.Н. Применение тросовых систем для очистки космического пространства от элементов космического мусора…… 78
Егорова Л.А., Лохин В.В. Альтернативные модели дробления метеороидов в атмосфере и их связь с оценкой энерговыделения….. 79
Ерошин В.А., Бойко А.В., Архангельский Е.А. Качение цилиндра по поверхности воды……... 80
Ерошин В.А., Самсонов В.А. О высокоскоростном входе тела в воду……. 80
Жакыпов А.Т., Заплетин М.П. Расчет оптимального плана съемки космического аппарата дистанционного зондирования Земли…….. 80
Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Численное исследование перекачки кинетической энергии от высокочастотных волн к низкочастотным в устойчивом ламинарном течении…… 81
Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Экспериментальное исследование влияния неравномерного вращения на изменение свойств турбулентных течений……... 82
Жуков А.В. Влияние намагничивающегося поверхностно-активного вещества на волновое движение жидкости во внешнем магнитном поле……. 82
Жуков С.А., Колдоба Е.В. Метод построения термических функций фазового равновесия…… 83
Завойчинская Э.Б. О критерии поэтапного усталостного разрушения металлов при полигармоническом процессе нагружения…… 83
Зайко Ю.С., Веденеев В.В., Сударикова А.Д. Экспериментальное исследование колебаний и устойчивости упругих трубок……... 84
Зайко Ю.С., Решмин А.И., Сударикова А.Д., Тепловодский С.Х. Расчетно-экспериментальное исследование течения в диффузоре с проницаемой перегородкой…….. 85
Залялутдинов Д.В., Осипцов А.Н. Задача о гравитационном осаждении дисперсной смеси в узком канале переменной толщины.. 86
Заплетин М.П., Кириллова П.А. Оптимизация цены продукта, распространенного среди разных слоев населения…….. 86

Заплетин М.П., Лескин А.В., Попов О.В. О некоторых свойствах алгоритма настройки интерфейса системы с учетом предпочтений пользователей определенного уровня доступа…… 87
Заплетин М.П., Лескин А.В., Попов О.В. О проблемах взаимодействия расчетно-аналитической автоматизированной подсистемы испытаний с базами данных…….. 88
Заплетин М.П., Лескин А.В., Попов О.В., Попов П.О. Применение вероятностно-статистической модели для прогнозирования баллистических испытаний с подвижного носителя……. 89
Заплетин М.П, Хамматова Г.М. Задача оптимального управления в системе производственного складирования……... 89
Заплетин М.П, Хапкин А.В. Анализ панельных данных при помощи метода опорных векторов……. 90
Зароднюк А.В., Черкасов О.Ю. Задача о брахистохроне в среде с сопротивлением……. 91
Зверев Н.А., Земсков А.В. Полярно-симметричная стационарная задача механодиффузии для ортотропного цилиндра.. 92
Звягин А.В. Решение краевой задачи в случае вырождения типа уравнения на границе области…… 92
Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Киселев Н.А., Стронгин М.М., Макарова М.С. Экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения газового потока в комбинированном расходном сопле……... 93
Зезин Ю.П., Изимов Р.М. Нелинейная ползучесть наполненного полиметилметакрилата…… 94
Зезин Ю.П., Соколов С.И. Нелинейные вязкоупругие свойства наполненных эластомеров……... 95
Зезин Ю.П., Тишин П.В. Методика экспериментального исследования длительной прочности полимерных материалов по результатам испытаний кольцевых образцов…….. 96
Зензинов А.А. Использование гибридного моделирования для исследования возможностей масштабирования распределенных информационных систем на примере ИАС «ИСТИНА»…….. 96
Зобова А.А., Моисеев Г.Н. Применение уравнений Я.В. Татаринова в динамике экипажа с омни-колесами с учетом массивности ролика…….. 97
Зобова А.А., Подкользина Е.Б. Динамика экипажа с дифференциальным приводом на плоскости с трением…… 98
Зубелевич О.Э. О периодических решениях одной гамильтоновой системы с некомпактным конфигурационным пространством……... 98
Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. Ромбовидное крыло в сверхзвуковом потоке…… 99

Зубков А.Ф., Симоненко М.М. Экспериментальное исследование трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевым уступом……... 100
Иванов О.О., Веденеев В.В. Экспериментальное изучение податливых покрытий на трение в турбулентном пограничном слое.. 100
Иванов С.И., Локтева Н.А. Определение перемещений консольно-закрепленной пластины Кирхгофа с помощью метода эквивалентных граничных условий…… 101
Инюхин А.В. Архив видеозаписей распределенного семинара по аэромеханике за 2011-2016 годы. Комплекс программных средств для анализа и хранения…….. 102
Исраилов М.Ш., Сердюк Д.О., Тарлаковский Д.В. Сейсмическое воздействие на подземные объекты большой протяженности…….. 102
Иткес А.А. Использование реляционной модели логического разграничения доступа в Web-приложениях на основе библиотеки Django…… 103
Ицкович М.О., Кулешов А.С. Существование лиувиллевых решений в задаче о качении эллипсоида вращения по абсолютно шероховатой плоскости……... 104
Калугин А.Г. О влиянии граничных условий на флексоэлектрическую неустойчивость нематического жидкого кристалла……... 104
Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. О парадоксе симметрии в задаче о проникании через поверхность жидкости плоских свободных вертикальных турбулентных струй…….. 105
Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. О проникании свободных вертикальных осесимметричных турбулентных струй через поверхность жидкости в узких плоских каналах…… 105
Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. Об автоколебаниях затопленных вертикальных осесимметричных струй в узких плоских каналах ……... 106
Карпов А.Э., Муравлев А.В. Об использовании пластической деформации в принципе запаздывания векторных свойств теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина…….. 106
Кирсанов М.Н. Расчет напряженного состояния шарниров плоских стержневых систем…… 107
Киселев А.Б. Некоторые точные решения задач расширения и сжатия слоистых полых шаров и цилиндрических труб под действием внешних динамических нагрузок…….. 107
Киселев А.Б., Пестов Д.А., Тюренкова В.В. Математическое моделирование роста трещины гидроразрыва пласта…….. 108
Киселев Н.А., Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование влияния

крупномасштабных вихревых структур на интенсификацию теплообмена и увеличение сопротивления на гладкой поверхности.. 109
Киселев Ф.Б., Сергеев Ф.В. Моделирование осадки сооружений на оттаивающих грунтах…… 110
Климина Л.А., Шалимова Е.С. Динамика двухпропеллерной ветроустановки с дифференциальной планетарной передачей…… 110
Ковальков В.К., Соколов А.В., Филиппов Я.Ю. Акустическая обработка твердосплавного инструмента…….. 111
Козицын А.С., Афонин С.А. Использование вероятностных оценок для определения версий переводных статей и соавторства в больших коллекциях библиографических данных……. 112
Козлов И.В., Никитин В.Ф., Скрылева Е.И. Моделирование влияния капиллярных эффектов на вытеснение вязких жидкостей из порового пространства…… 113
Козлов И.И., Очеретяный С.А., Прокофьев В.В. О влиянии акустических характеристик подводящего трубопровода на кавитационные автоколебания……... 114
Козлов М.В., Шешенин С.В. Улучшенная тепловая модель в задаче нахождения технологических деформаций композита……. 114
Колдоба Е.В., Романова А.Ю. Математическое моделирование PVT-свойств природных углеводородных растворов……... 115
Колдоба Е.В., Романова А.Ю., Станченко В.С. Ускорение расчетов фазовых диаграмм с помощью модифицированных функций фазового равновесия…… 115
Коровайцева Е.А. Построение поверхностных функций влияния для вязкоупругой полуплоскости…… 116
Коровайцева Е.А., Тарлаковский Д.В., Щербаков В.А. Нестационарные радиальные электромагнитоупругие колебания толстостенного цилиндра под действием внешнего поля давления... 116
Коровайцева Е.А., Чан Ле Тхай, Тарлаковский Д.В. Осесимметричное движение упругого моментного полупространства под действием нестационарных поверхностных касательных сил…… 117
Коровин В.М. Распад тонкого плоского слоя жидкого диэлектрика, движущегося в газе, при наличии перпендикулярного электростатического поля…… 117
Коротеев А.А., Осипцов А.Н., Попушина Е.С. Модель улавливания капель теплоносителя на свободную пленку в открытом космосе…….. 118
Коршунов А.А. Подсистема поддержки WEB-страницы научного семинара в ИАС «ИСТИНА»…….. 118
Косинов С.А., Михальченко Е.В., Нерченко В.А., Никитин В.Ф., Стамов Л.И., Тюренкова В.В., Филиппов Ю.Г. Влияние электромагнитного поля на движущиеся объекты…… 120

Косьянчук В.В., Якунчиков А.Н. Эффект разделения газовых смесей в микроканале с подвижной границей……... 121
Котелкин В.Д., Монахов А.А. Исследование течений в асимметричном цилиндрическом зазоре……. 121
Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р. Наблюдательные проявления авюволн в областях фотодиссоциации……... 122
Краснопольский Б.И. Об ускорении расчета турбулентных течений за счет моделирования нескольких реализаций течения на примере задачи обтекания куба……. 122
Кривчиков М.А. Выделение независимых ветвей вычислений в унаследованном коде с использованием средств автоматизированного анализа программ…… 123
Крупнов А.А. Методология квантово-механического моделирования рекомбинации диссоциированного воздуха на каталитической поверхности…….. 124
Кручинин П.А. Учет сухого трения в моделях качения деформируемого колеса……... 124
Кугушев Е.И., Левин М.А., Попова Т.В. О механических системах с быстро вибрирующими связями…….. 125
Кузнецова Ел.Л., Митин А.Ю., Федотенков Г.В. Пространственное нестационарное движение круговой цилиндрической оболочки типа Тимошенко……. 126
Кузнецова Ел.Л., Сердюк А.О., Федотенков Г.В. Метод поиска и идентификации дефектов в элементах конструкции с применением нейронных сетей…… 126
Куликовский А.Г., Свешникова Е.И. Нелинейные упругие волны за фронтом затвердевания…… 127
Латышева Т.А., Якунчиков А.Н. Исследование влияния нанопузырьков газа на вязкие напряжения на границе контакта воды и гидрофобной поверхности…….. 128
Лебедев Д.А. Устойчивость и стабилизация стационарных движений диска, несущего гироскоп…….. 129
Лебедева Н.А., Осипцов А.Н. Лагранжево моделирование структуры зон аккумуляции инерционной примеси в плоских и осесимметричных вихревых течениях…… 130
Левин В.А., Афонина Н.Е., Громов В.Г., Мануйлович И.С., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н., Марков В.В. Исследование спектрального состава сигналов пульсаций давления газа в кольцевых и линейных двухщелевых соплах……. 131
Левин В.А., Афонина Н.Е., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н. Исследование изменения давления газа на стенку сферического реактора при горении……... 132
Левин В.А., Афонина Н.Е., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н. Численное моделирование воспламенения

метано-воздушной смеси: признаки воспламенения и время индукции…… 133
Левин В.А., Афонина Н.Е., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н. Экспериментальное исследование концентрационных пределов распространения пламени в метано-воздушных смесях с углеводородными добавками…….. 134
Левин В.А., Журавская Т.А. О способах управления положением стабилизированной детонации в сверхзвуковом потоке газа в плоском канале……... 135
Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Вращающаяся детонация в тяговом модуле с кольцевым соплом…… 135
Леонтьев Н.Е., Рощин Е.И. Численное решение задачи о закачке суспензии в пористый пласт……... 136
Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г., Назаров В.В. Исследование напряжений в керамическом покрытии лопатки турбины ГТД при взаимодействии с газовым потоком…… 137
Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г., Назаров В.В. Исследование напряженного состояния в столбчатом теплозащитном керамическом покрытии лопаток турбин ГТД в поле центробежных сил…….. 137
Логвенков С.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А., Юдина Е.Н. Континуальное моделирование активной среды, состоящей из слабо взаимодействующих клеток и жидкости…… 138
Локощенко А.М. Осадка составного цилиндра при ползучести. 139
Локощенко А.М., Абросимова Е.А. Исследование ползучести мембраны внутри прямоугольной матрицы при различных контактных условиях……... 139
Локощенко А.М., Фомин Л.В. О применении дробно-линейной модели ползучести и длительной прочности при нестационарном сложном напряженном состоянии в пластине с учетом влияния агрессивной среды…… 140
Локтева Н.А., Синодов Н.А. Анализ виброускорений, возникающих в различных точках грунта после прохождения волной преграды сложной конструкции…… 141
Лужин А.А. Двухпараметрическая модель равновесия блочного лука…… 141
Лущик В.Г., Макарова М.С., Здитовец А.Г. Численное исследование турбулентного течения и теплообмена в трубе с вдувом газа через проницаемые стенки……... 142
Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Влияние ламинаризации потока на теплообмен при течении в плоском канале с конфузором…… 142
Любичева А.Н., Моссаковский П.А. Анализ влияния параметров рельефа поверхности на силу сопротивления при скольжении по эластомеру……... 143

Мануйлович И.С. Исследование детонации в изогнутом канале круглого сечения……... 144
Мартынова Е.Д. Описание конечных деформаций вязкоупругого цилиндра при кручении с использованием семейства объективных производных Гордона – Шоуолтера…… 144
Мартынова Е.Д., Муравлев А.В. Экспериментальная методика определения сдвиговых свойств вязкоупругих материалов с внутренним сухим трением…….. 145
Маслов С.А. Вейвлет-анализ турбулентности в атмосферных и плазменных процессах…….. 146
Мастерова А.А. О моделировании динамики малой ветроэнергетической установки на базе ротора Савониуса……. 147
Меркулов Д.И., Муравлев А.В., Налетова В.А., Пелевина Д.А., Турков В.А. Экспериментальное исследование вязкоупругих свойств намагничивающихся эластомеров в магнитном поле……. 147
Михальченко Е.В., Стамов Л.И., Рыбакин Б.П. Решение задач инициирования детонации при отражении ударной волны от клина. 148
Могилевский Е.И. Развитие нелинейных волн в стекающей пленке в переменном электрическом поле……. 149
Моисеева И.Н., Штейн А.А. Влияние неоднородности упругих свойств роговицы на результаты клинических измерений…….. 149
Монахов А.А. Экспериментальное исследование кавитациии в зазоре между вращающимися цилиндрами…… 150
Морозов В.М., Каленова В.И. О некоторых задачах управления в космической динамике……. 151
Моссаковский П.А., Костырева Л.А., Инюхин А.В., Белякова Т.А., Беляев А.П. Экспериментальное исследование динамических свойств материалов по методу Кольского. Задача физико-механического практикума…… 151
МуравлевА.В., Степина М.А. О соответствии диаграмм деформирования высокоэластичной вулканизированной резины некоторым упругим потенциалам……... 152
Назаров В.В. Сравнение механических характеристик ползучести титановых сплавов ВТ5 и ВТ6 при одинаковой температуре 650 ^{o}С……... 153
Натяганов В.Л., Скибицкий А.Н., Шопин С.А. Дегазационная природа световых предвестников землетрясений и облачных сейсмотектонических индикаторов…… 153
Натяганов В.Л., Скобенникова Ю.Д., Степанов И.В. Волноводный механизм электромагнитной накачки земных недр как триггер землетрясений и вулканизма……... 154
Нерченко В.А., Никитин В.Ф., Стамов Л.И. Моделирование трехмерных задач отражения ударной волны от поверхности конуса на многопроцессорной супер ЭВМ…… 155

Никабадзе М.У., Улуханян А.Р. О расщеплении начально-краевых задач в теориях тонких тел……... 156
Никабадзе М.У., Улуханян А.Р. Определение скоростей распространения волн в некоторых средах через собственные значения материальных тензоров……... 157
Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Вклад И.Н. Зверева в развитие теории детонации гетерогенных систем, кавитационных и гейзерных эффектов в криогенных жидкостях……... 158
Никитин Н.В. Характеристики неустойчивости реалистичных полосчатых структур в турбулентном течении в плоском канале….. 159
Никитин Н.В., Попеленская Н.В. Основные характеристики турбулентных вторичных течений в прямых трубах…… 160
Никитина Н.А., Пичугина Д.А., Кузьменко Н.Е. Квантово-химическое моделирование взаимодействия кислорода с кластером $Au_n(SR)_m$ и его фрагментами……... 160
Овчинникова Н.В. Зависимость решения от коэффициента Пуассона в задаче о конечной деформации трубы под действием внутреннего и внешнего давления…….. 161
Оконечников А.С., Панкратова О.А., Федотенков Г.В. Нестационарное воздействие подвижного штампа на упругую полуплоскость……... 162
Павлов Д.В., Калугин А.Г. О периодических решениях в слое нематического жидкого кристалла……. 163
Панкратьева И.Л., Полянский В.А. Биполярные структуры в ЭГД-течениях в микроканалах при воздействии поля на объемный источник ионов…….. 163
Пастушков П.П., Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Павленко Н.В. Разработка математических моделей прогнозирования эксплуатационных теплофизических показателей строительных материалов……. 164
Пивоваров Д.Е., Никитин Н.В. Численное обнаружение конвективных всплесков в подогреваемом снизу наклонном канале…… 165
Пиманов В.О., Никитин Н.В. О механизме формирования стационарных продольных вихрей в пристенных турбулентных структурах……. 165
Погосбекян М.Ю., Крупнов А.А. Моделирование реакции рекомбинации $H + O_2 \rightarrow HO_2$ из первых принципов…… 166
Погосбекян М.Ю., Сергиевская А.Л., Смехов Г.Д. Исследование процесса диссоциации азота: траекторные расчеты, теоретические модели, эксперимент…….. 167
Порошина А.Б., Веденеев В.В. Осесимметричное стационарное состояние упругой трубки при протекании через нее неньютоновской жидкости…… 168

Привалова О.Г. Параметрический анализ устойчивости семейства нескольких режимов авторотации…….. 168
Прокофьев В.В., Филатов Е.В., Такмазьян А.К. Сравнительные исследования эффективности различных волновых движителей в лабораторном и численном эксперименте…….. 169
Прошкин В.А. Два примера ограниченности «ограниченных» задач механики…….. 169
Пряжевский Р.Д., Федотенков Г.В. Аналитическое решение некоторых плоских нестационарных контактных задач с подвижными границами для абсолютно твердых ударников и упругого полупространства…….. 170
Пузина Ю.Ю., Левашов В.Ю. Влияние граничных условий на характер движения межфазной поверхности жидкость-пар при пленочном кипении на поверхности шара…….. 171
Пшеничнов С.Г. Построение решений нестационарных динамических задач для линейно вязкоупругих тел……. 172
Решмин А.И., Зайко Ю.С., Сударикова А.Д., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. Экспериментальное изучение нагретой затопленной струи, натекающей на плоскую поверхность…….. 173
Решмин А.И., Сударикова А.Д., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. Развитие турбулентности в коническом диффузоре с положительным градиентом давления…… 174
Роганов В.А. Основные виды прообразов программ, компетентные базы знаний и динамическая генерация специализированного программного кода……. 175
Рязанцева М.Ю. Динамика упругих трехслойных композитов: низкочастотные и высокочастотные процессы……. 176
Сальникова Т.В. Неравновесная термодинамика в циклах Пуанкаре…… 177
Самохин А.С. Оптимизация перелета к Фобосу с комбинированной ограниченной большой и малой тягой……. 177
Самохин А.С., Самохина М.А. Методика построения оптимальных траекторий с ограниченной тягой в задачах с фазировкой…….. 178
Сахаров А.Н., Хабибулин Э.Т., Чистяков П.В. Кинетическая энергия балки с распространяющейся трещиной при стесненном изгибе……. 179
Сахаров А.Н., Чистяков П.В, Шеленков А. Обобщение формулы Релея на случай колебаний упругого стержня с учетом силы тяжести.. 180
Сисоев Г.М., Беннетт К.Дж. Волновые режимы в двухфазных течениях в микроканалах……. 180
Смирнова М.Н., Тюренкова В.В. Моделирование горения поверхности в потоке окислителя……... 181
Сутырин О.Г. Взаимодействие ударной волны с цилиндрическим облаком мелкодисперсной пыли…… 181

Терауд В.В. Поиск экспериментальных условий образования локализации деформаций при высокотемпературном растяжении образцов в условиях ползучести……. 182
Тимохин Е.В. Нестационарный электрокапиллярный дрейф невесомой сферической капли…… 183
Тирский Г.А. Аналитическое решение уравнений физической теории метеоров для единого (недробящегося) тела с потерей массы с учетом переменных коэффициентов уноса массы в неизотермической (произвольной) атмосфере……... 184
Толоконников С.Л. Об одном подходе к решению задач о форме воронок выброса при взрыве поверхностных или заглубленных зарядов……... 184
Тунг Нгуен Тхань, Тарлаковский Д.В. Интегральное представление характеристик нестационарного электромагнитного поля в движущейся полуплоскости…… 185
Тунгускова З.Г., Финошкина А.С. О возможностях модификации соотношений пластичности при конечных деформациях…… 185
Туник Ю.В. Результаты численного моделирования детонационного горения на основе модифицированной схемы С.К. Годунова…… 186
Тятюшкин А.Н. Неустановившееся электровращение капли вязкой слабопроводящей поляризующейся жидкости в постоянном электрическом поле…….. 186
Филатов Е.В., Якимов А.Ю. Сопротивление пластинки, глиссирующей по мелкой воде…… 187
Филиппов Я.Ю., Ковальков В.К., Путляев В.И. Создание биорезорбируемых макропористых материалов для костной инженерии методом коллоидного формования……..……... 188
Фокеев В.П. О формировании и обратном воздействии газовых неоднородностей в маховской конфигурации при автомодельном отражении сильных ударных волн от плоской поверхности……... 189
Хазов Д.Е., Здитовец А.Г. Численное и экспериментальное исследование газодинамического метода безмашинного энергоразделения сверхзвукового потока…….. 189
ХамзаевА.Д. «STEM-образование» – наука, технология, инженерия и математика – зарубежный опыт……... 190
Хохлов А.В. Диаграммы нагружения с постоянной скоростью, порождаемые нелинейной теорией наследственности Ю.Н. Работнова……. 191
Цветкова Ю.Д. Модель движения магмы в канале с упругими стенками…… 192
Чистяков П.В., Сахаров А.Н., Новотный С.В., Жуков А.И. Высокотемпературные исытания образцов из титанового сплава на кручение в широком диапазоне скоростей деформации……. 192

Чулюнин А.Ю. Исследование аэродинамики тандема тел со щитком в рамках URANS, RSM и DES подходов к описанию турбулентности……. 193
Шалеев К.В. Подход к разработке технологии нанесения покрытий на внутренние поверхности изогнутых трубопроводов с помощью плазменной обработки……. 193
Шамолин М.В. Негладкие первые интегралы в системах с диссипацией……... 194
Шарафутдинов Г.З. О физических основах метода фотоупругости…….. 195
Шачнев Д.А. Визуальный редактор онтологий на языке JavaScript: особенности реализации и хранения данных……. 195
Шешенин С.В. Моделирование легковой шины при сильном деформировании……... 196
Шишаева А.С., Веденеев В.В., Аксенов А.А. Нелинейные колебания упругой пластины в нестационарном трансзвуковом потоке газа……. 197
Шундеев А.С. Об одном подходе к управлению документальными данными……. 198
Эглит М.Э., Якубенко А.Е., Дроздова Ю.А. Проблемы построения трехмерных математических моделей склоновых потоков……... 198
Эглит М.Э., Якубенко А.Е., Якубенко Т.А. Склоновые потоки как потоки вязкопластических сред…… 199
Якунчиков А.Н. Метод событийного молекулярно-динамического моделирования течений разреженного газа…… 200
Янков Я.Д. Дисперсные системы с несжимаемой дисперсной фазой……. 200
Авторский указатель……..…… 201

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В УЗКОМ КАНАЛЕ С СУПЕРГИДРОФОБНОЙ СТЕНКОЙ

А.И. Агеев [1], *Г.М. Азанов* [1,2], *И.В. Голубкина* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Структурированные супергидрофобные поверхности (СГП) имеют микрокаверны, в которых силой поверхностного натяжения удерживаются газовые пузырьки. Такие поверхности применяются для снижения трения в устройствах микрофлюидики (лаборатория на чипе), при течении жидкости в каналах толщиной несколько десятков микрометров и др. Для оценки снижения трения (или перепада давления) в таких системах используется осредненная длина скольжения, характеризующая СГП с заданной текстурой. Коэффициент осредненной длины скольжения жидкости связывает величину осредненной касательной скорости (обусловленной наличием проскальзывания на поверхности газовых пузырьков) с осредненным касательным трением, вычисленным на стенке. Величина осредненной длины скольжения зависит от относительной ширины микрокаверны (доли газового участка), формы газового пузыря и положения мениска в каверне [1]. Радиус кривизны межфазной границы определяется углом смачивания в точке закрепления мениска на стенках микрокаврены. Положение точек закрепления межфазной границы определяется массой газового пузыря в каверне и величиной локального давления в жидкости. При течении жидкости через микроканал давление изменяется по продольной координате, поэтому положение мениска меняется от каверны к каверне. В работе разработана математическая модель для определения положения мениска в микрокавернах при течении вязкой жидкости через канал с нижней СГП, образованной периодической полосчатой системой прямоугольных микрокаверн. Для решения двумерной задачи о стоксовом течении вязкой жидкости над каверной, содержащей межфазную границу с заданным на ней условием отсутствия касательных напряжений, разработан оригинальный численный алгоритм, основанный на методе граничных интегральных уравнений. С использованием разработанного алгоритма численно исследована зависимость осредненной длины скольжения от геометрических параметров текстуры. Результаты расчетов для предельных случаев с высокой точностью совпадают с данными, представленными в литературе. Определены границы применимости разработанной математической модели. Исследовано влияние газовых пузырьков, удерживаемых текстурой СГП, на интенсивность снижения трения в микроканале с полосчатой СГП. Разработанные методы расчета и полученные результаты могут быть использованы для оптимизации супергидрофобных поверхностей, используемых для снижения гидродинамического сопротивления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-31-00069).

Литература

1. *Агеев А.И.* Стоксово течение над каверной супергидрофобной поверхности, содержащей пузырек газа / *А.И. Агеев, А.Н. Осипцов* // Изв. РАН. МЖГ. – 2015. – № 6.

ТЕЧЕНИЕ ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СМЕСИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Г.М. Азанов, А.Н. Осипцов

НИИ механики МГУ, Москва

Настоящая работа является продолжением исследования перспективных методов повышения эффективности энергоразделения газовых потоков по схеме академика А.И. Леонтьева [1]. В [2, 3] рассмотрены задачи о влиянии испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сверхзвуковом двухфазном пограничном слое и о теплообмене между сверхзвуковым двухфазным и дозвуковым однофазным потоками газа. В отличие от рассматриваемой в [2, 3] модели двухфазного сверхзвукового пограничного слоя с испаряющейся дисперсной фазой постоянной температуры, в настоящей работе рассматривается случай переменной температуры жидкой фазы. Исследуется диапазон температур, в котором испарением капель можно пренебречь. Основное внимание уделено исследованию влияния разности температур в начальном сечении внешнего потока на температуру адиабатической стенки. В результате межфазного обмена импульсом и энергией во внешнем потоке возникает ненулевой продольный градиент давления, что также существенно отличает рассматриваемую постановку от [2]. В численных расчетах был рассмотрен характерный для мелких капель случай отсутствия подъемной силы Сэфмана, что позволяет не учитывать образование жидкой пленки на поверхности пластины. Результаты параметрических расчетов показывают, что температура восстановления адиабатической стенки существенно зависит от начальной температуры капель. В случае «горячих» капель, начальная температура которых превышает температуру газа во внешнем потоке, температура адиабатической стенки заметно увеличивается, что приводит к уменьшению разности между температурами восстановления в до- и сверхзвуковом пограничных слоях и, соответственно, к уменьшению эффективности энергоразделения потока в случае теплопроводной стенки. В тех случаях, когда температура капель в набегающем потоке меньше температуры газа, температура восстановления в сверхзвуковом пограничном слое резко снижается, что приводит к значительному увеличению теплового потока через теплопроводную стенку и повышению эффективности энергоразделения.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-19-00699).

Литература

1. *Леонтьев А.И.* Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // *А.И. Леонтьев //* Теплофизика высоких температур. – 1997. – Т. 35. – № 1.
2. *Азанов Г.М.* Влияние мелких испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое / Г.М. Азанов, А.Н. Осипцов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 4.
3. *Azanov G.M.* The efficiency of one method of machineless gasdynamic temperature stratification in a gas flow / G.M. Azanov, A.N. Osiptsov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 106.

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ РИМАНА УРАВНЕНИЯ ОДНОМЕРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

А.В. Аксенов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Система уравнений одномерной газовой динамики, описывающая баротропные движения газа, линеаризуется преобразованием годографа. Для степенной зависимости давления от плотности линейная система уравнений сводится к уравнению Эйлера – Пуассона – Дарбу (Э-П-Д). Предложен метод построения функции Римана гиперболического уравнения второго порядка с двумя независимыми переменными, основанный на использовании допускаемой группы преобразований. Найдены симметрии уравнения Э-П-Д и построена функция Римана. Функция Римана уравнения Э-П-Д описывает с точностью до постоянного множителя решение характеристической задачи для взаимного проникновения двух центрированных волн разряжения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 15-01-04677).

СЛОЖНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ СЛОВА И ЕГО ИСКАЖЕНИЙ В ПОТОКЕ ДАННЫХ

Д.Е. Александров

НИИ механики МГУ, Москва

Анализ потоков данных является важнейшим направлением в области информационной безопасности. Среди существующих на сегодняшний день методов исследования данных наибольшее распространение получил поиск по сигнатурам – обнаружение заранее заданных наборов «слов» или шаблонов в проверяемом «тексте». Такой поиск может быть достаточно эффективно реализован на практике с помощью детерминированных и недетерминированных конечных автоматов. Однако сложность обнаруживающего (или «распознающего») автомата, выражающаяся в количестве его состояний, может достаточно сильно зависеть от размера и вида сигнатуры.

Доклад посвящен проблеме сложности обнаружения слов в потоке данных, в котором возможны искажения. То есть, имея сигнатуру в виде набора слов, необходимо обнаружить присутствие в исследуемом тексте не только самих слов из сигнатуры, но и «похожих» на них слов. В рамках настоящего доклада «похожими» считаются слова одной длины, у которых количество различающихся букв не превышает заданного порога (называемый «порогом ошибки»). Получены нижняя и верхняя оценки количества состояний распознающего автомата для задачи обнаружения слов, похожих на заданное. Для одного из классов слов получена точная оценка количества состояний автомата, реализующего поиск слов, которые похожи с заданным порогом ошибок.

РОСТ И ЗАТУХАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

А.И. Алексюк, В.Я. Шкадов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Наиболее распространенной гипотезой о физическом механизме перехода к трехмерности в следе за цилиндром является гипотеза об эллиптической неустойчивости вихрей [1-3]. Эта гипотеза основывается на сходстве трехмерного течения в формирующихся и оторвавшихся вихрях с идеализированным течением, возникающим при трехмерной неустойчивости неограниченного течения с эллиптическими линиями тока [4]. Однако нет подтверждений того, что именно этот механизм вызывает трехмерную неустойчивость при превышении критического числа Рейнольдса. Кроме того, из результатов [5] следует, что при изучении процесса формирования трехмерных вихрей в ближнем следе за цилиндром необходимо учитывать течение в гиперболической области (скорость деформации жидких частиц больше их скорости вращения), в которой происходит интенсивный рост трехмерных возмущений.

В настоящей работе изучается начальная стадия развития крупно- (мода А) и мелкомасштабных (мода В) трехмерных структур в ближнем следе за цилиндром. Описание их развития проведено путем анализа влияния трех механизмов – деформации вихревых линий основным течением, деформации вихревых линий основного течения, диффузии вихрей за счет вязкости. Для построения полей, определяющих эти механизмы, использовались результаты численного решения двух- и трехмерных начально-краевых задач для уравнений Навье – Стокса. Выделены области роста и затухания возмущений, соответствующих модам А и В, а также моменты времени и области их наиболее интенсивного роста.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-05186).

При выполнении работы использовались ресурсы суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

1. *Williamson C.H.K.* // J. Fluid Mech. – 1996.
2. *Leweke T.*, Williamson C.H.K. // Eur. J. Mech. – BFluids. – 1998.
3. *Thompson M.C.*, Leweke T., Williamson C.H.K. // J. Fluids Struct. – 2001.
4. *Landman M.J.*, Saffman P.G. // Phys. Fluids. – 1987.
5. *Barkley D.* // Phys. Rev. E. – 2005.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

П.Р. Андронов [1], *С.В. Гувернюк* [1], *Я.А. Дынников* [1,2], *Г.Я. Дынникова* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]ЗАО «Т-Сервисы», Москва

Рассмотрена плоская сопряженная задача о поперечных колебаниях в потоке вязкой несжимаемой среды симметричного гидроаэродинамического профиля, имеющего форму эллипса, закрепленного под заданным начальным углом атаки на конце линейно упругой пружины. Для численного решения использована бессеточная вычислительная технология

безытерационного совместного решения уравнений динамики и гидродинамики на основе численного метода вязких вихревых доменов. Представлены результаты методических исследований сходимости результатов расчетов при увеличении степени дискретизации.

Исследовано влияние безразмерных параметров (жесткость пружины, относительная плотность тела, угол атаки профиля) на мгновенные и осредненные значения безразмерных аэродинамических нагрузок на колеблющийся профиль. Идентифицировано влияние на аэродинамические нагрузки периодически сходящих с поверхности эллиптического цилиндра вблизи его задней кромки крупных вихрей (которые вызывают длинноволновые колебания нестационарных аэродинамических нагрузок) и аналогичных, но относительно мелких вихрей, формирующихся в результате блуждающего вязкого отрыва на подветренной поверхности эллиптического профиля (которые порождают соответствующую высокочастотную составляющую колебаний аэродинамических характеристик). Показано, что одновременное существование двух «вихревых» частот в случае относительно небольшой безразмерной плотности тела приводит к его ответным поступательным колебаниям в поперечном к потоку направлении с двумя основными периодами. Результаты получены для числа Рейнольдса Re = 1200 по длине хорды профиля.

Продемонстрирована способность применяемой безытерационной вычислительной технологии описывать предельный вырожденный случай нулевой инерционности тела. Построено решение плоской сопряженной задачи о самопроизвольных движениях в набегающем потоке вязкой несжимаемой жидкости эллиптического цилиндра с удлинением 8, имеющего нулевую плотность и две степени свободы – вращательную и поступательную поперек набегающего потока. Оказалось, что с течением времени возникают квазипериодические сложные колебания «сверхлегкого» профиля, сопровождающиеся резкими остановками и поворотами.

Построенные в настоящей работе численные решения сопряженных задач используются для обоснования, тестирования и определения границ применимости различных приближенных феноменологических моделей определения нестационарных аэродинамических нагрузок на тела, движущиеся с переменной скоростью в сопротивляющейся сплошной среде.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.576.21.0079, проект RFMEFI57614X0079).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАХОВСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С НЕРОВНОСТЯМИ

С.И. Арафайлов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Численно решалась задача расчета взаимодействия ударной волны с поверхностью жесткого тела. Параметры – наклон волны и интенсивность – выбирались из области неоднозначности так, чтобы было возможно как маховское, так и регулярное взаимодействие.

В качестве начальных условий было взято маховское отражение прямой ударной волны от плоской поверхности. Затем эта конфигурация набегала на неровность – выемку или выпуклость конечного размера. Исследовалось изменение высоты ножки Маха после прохождения конфигурацией неровности.

В расчете полагалось, что газ совершенный, невязкий и нетеплопроводный. В расчетной области выделялись поверхности разрыва – ножка Маха и контактная поверхность.

Основная проблема алгоритма расчета состояла в определении движения тройной точки. Эта задача была реализована с помощью характеристических соотношений и дифференцирования граничных условий.

Расчеты показали различный характер поведения тройной точки при взаимодействии маховской конфигурации с неровностями.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ С ЗАГЛУБЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЬЮ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.М. Арутюнян [1], *Г.В. Федотенков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается плоская нестационарная задача о распространении объемных возмущений в однородном линейно упругом полупространстве, имеющем заглубленную полость произвольной геометрии и расположения с гладкой границей. Предполагается, что массовые силы в полупространстве отсутствуют. Используем прямоугольную декартову систему координат. Одна из осей направлена вдоль невозмущенной границы полупространства, вторая – вглубь полупространства.

Предполагается, что полость имеет бесконечную протяженность в направлении одной из осей, что приводит к плоской постановке задачи. Полагаем, что на контуре полости заданы перемещения, напряжения или смешанные граничные условия.

Движение упругого полупространства описывают уравнения Ламе в перемещениях. Также в постановку задачи включаются соотношения Коши и закон Гука. Полагаем, что в начальный момент времени полупространство с полостью находится в состоянии покоя, что приводит к нулевым начальным условиям.

Метод решения основан на принципе суперпозиции и динамической теореме взаимности работ. Алгоритм решения соответствующих интегральных уравнений строится с использованием прямого метода граничных элементов. При этом в каждый момент времени в полупространстве выделяется область, которая находится в возмущенном состоянии и вне которой возмущения отсутствуют. Ее размеры возможно определить исходя из гиперболического типа уравнений движения, благодаря чему возмущения в полупространстве распространяются с конечной скоростью, равной скорости волн растяжения-сжатия. Это позволяет использовать в качестве фундаментальных решений функции влияния для упругого пространства (в плоской постановке – для упругой плоскости). Они представляют собой перемещения и напряжения, возникающие в бесконечной упругой плоскости от воздействия мгновенной сосредоточенной силы. С использованием этих фундаментальных решений и теоремы взаимности поставленная задача сводится к разрешающей системе двумерных интегральных уравнений, ядрами которых выступают упомянутые фундаментальные решения. При этом интегрирование по пространственной переменой проводится вдоль контура полости и вдоль отрезка границы полуплоскости, размер которого определяется скоростью волн растяжения сжатия, геометрией и расположением полости. Эти линии назовем границами актуального пространственно-временного домена (АПВД).

В каждый момент времени границы АПВД приближенно аппроксимируются кусочно-постоянными ломаными с постоянным шагом. Интегральные операторы разрешающей системы уравнений дискретизируются по пространственной переменной. В результате приходим к системе одномерных интегральных уравнений в свертках по времени. Для ее решения используем два подхода. Первый из них заключается в дискретизации интегральных операторов по временной переменной, а второй основан на применении прямого и обратного интегрального преобразования Лапласа по времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 17-08-01127; 16-08-00260).

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ДИСПЕРСИЯ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ С АНИЗОТРОПНЫМИ СУПЕРГИДРОФОБНЫМИ СТЕНКАМИ

Е.С. Асмолов [1,2], *О.И. Виноградова* [2], *Т.В. Низкая* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]ИФХЭ РАН, Москва

В канале с супергидрофобными (СГ) стенками под действием градиента давления генерируются сложные структуры течения, связанные с анизотропным скольжением. Рассмотрены СГ поверхности с чередующимися полосами твердых и газовых участков. Получено решение для трехмерного течения в канале со скрещенными полосчатыми стенками на основе приближенного решения уравнений Стокса. Среднее течение представляет собой суперпозицию течений Пуазейля, поперечного сдвига и однородного течения скольжения. Течение в поперечном направлении сопровождается образованием пары вихрей. Поперечный сдвиг значительно усиливает дисперсию броуновских частиц в широких каналах. Получены простые оценки для дисперсии в поперечном направлении на малых и больших временах, которые позволяют найти оптимальные значения чисел Пекле, при которых достигается максимальная дисперсия в канале заданной длины. Оценки согласуются с результатами компьютерного моделирования дисперсии ансамбля частиц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-03069).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНЗЫ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО РАССОЛА ПРИ ДЕГАЗАЦИИ МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА

А.А. Афанасьев, О.Э. Мельник

НИИ механики МГУ, Москва

Дегазация магматических очагов в процессе их остывания и кристаллизации приводит к выделению в окружающие пористые породы горячих насыщенных солями и металлами водных флюидов, которые при определенных условиях приводят к образованию рудных месторождений. Температуры и давления магматических флюидов лежат в области сверхкритических параметров, а при их подъеме к поверхности при охлаждении и падении давления происходит расслоение флюидов на отдельные фазы, сопровождающееся различными фазовыми переходами. Для системы соль-вода возможны однофазные, двухфазные и трехфазные состояния, в частности, с выпадением соли в твердую фазу. Моделирование подобных систем имеет большое практическое значение,

связанное с возможностью научного прогнозирования условий формирования рудных, в частности, медных и полиметаллических месторождений. Оно сопряжено с определенными трудностями, вызванными необходимостью учета широкого диапазона термобарических условий, фазовых переходов, изменения пористости и проницаемости скелета при выпадении солей в осадок в виде твердой фазы.

Создана математическая модель фильтрации бинарной смеси соль-вода в условиях значительного изменения давления и температуры с учетом различных многофазных термодинамических равновесий смеси. В рамках модели исследовано формирование линз концентрированного рассола над дегазирующимся магматическим очагом, которые связывают с образованием рудных месторождений полезных ископаемых. Показано, что формирование линзы обусловлено фазовыми переходами двух различных типов, происходящих на различной глубине в поднимающемся к поверхности магматическом флюиде. В приповерхностных областях выпадение соли в осадок в виде твердой фазы на скелет пористой среды приводит к закупорке порового пространства – снижению проницаемости. В результате поток магматического флюида к поверхности перекрывается, способствуя накоплению концентрированного рассола в локализованной области.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 16-17-10199).

ВЫЯВЛЕНИЕ ПУТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ПРИМЕРЕ СЕТИ TWITTER

С.А. Афонин [1], *И.И. Богомолов* [2], *И.В. Сильниченко* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Схемой распространения информации в социальной сети назовем ориентированный граф, вершины которого соответствуют пользователям сети, а ребра отражают факт передачи информации между пользователями. Задача выявления путей распространения информации состоит в построении такого графа по имеющимся данным об активности пользователей в социальной сети. В случае социальной сети Twitter доступные данные представляют собой набор записей, включающих дату публикации сообщения, уникальный идентификатор сообщения и идентификатор пользователя, который его опубликовал. Следует отметить, что в силу технических особенностей сети Twitter одно сообщение может быть опубликовано несколькими пользователями. Такое поведение называется ретвитом. Наличие уникальных идентификаторов сообщений и возможность ретвитов позволяет исключить из рассмотрения сложную задачу определения схожести двух текстов: в рамках данной работы считается, что два сообщения относятся к одной теме, если их идентификаторы совпадают. Также следует отметить, что информация о том, у какого именно пользователя автор ретвита получил сообщение, недоступна.

Выявление путей распространения информации основано на следующем наблюдении. Если какой-либо пользователь сети сделал ретвит сообщения, то он мог получить его от любого пользователя, опубликовавшего это сообщение раньше. Таким образом можно составить множество ребер, являющихся кандидатами на включение в схему распространения информации. Достоверность восстановления ребер может быть повышена, если рассматривать цепочки распространения нескольких сообщений. Можно ожидать, что если между пользователями сети действительно происходит передача информации, то найдется несколько сообщений, которые появились у одного пользователя раньше, чем у другого.

Формальная модель описывает схему распространения информации как полный граф, ребрам которого сопоставлены два параметра: вероятность передачи сообщений по данному ребру и задержка по времени при передаче. Разработан итерационный алгоритм определения данных параметров по доступным данным. Итоговая схема распространения информации получается в результате отсечения ребер с низкими значениями вероятности передачи данных. В целях уменьшения объема обрабатываемых данных и представления результатов в более компактной форме в исходном графе пользователей сети выделяются сообщества методом sequential clique percolation.

Тестирование данного метода выявления путей распространения информации производилось как на синтетических данных (с известной схемой распространения информации), так и на реальном массиве данных, включающем русскоязычные сообщения Twitter за несколько суток общим объемом 15 млн сообщений. В случае реальных данных корректность полученного ответа может быть частично проверена путем сопоставления ребер схемы распространения информации со списком подписчиков соответствующих пользователей сети. Технические особенности сети Twitter позволяют предположить, что пользователь, по большей части, делает ретвиты сообщений, которые были опубликованы теми, на кого он подписан. Предварительные данные тестирования показывают, что предлагаемый метод позволяет с достаточно высокой точностью восстанавливать схему распространения информации, однако количественная оценка полноты и точности алгоритма является предметом дальнейшей работы.

ЗАДАЧА О СВОБОДНОЙ ВЫДУВКЕ КУПОЛА ИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

А.Ф. Ахметгалеев, Н.В. Овчинникова

НИИ механики МГУ, Москва

В программном комплексе ANSYS проведено численное моделирование процесса свободной пневмоформовки купола из листовой заготовки круглой формы, жестко защемленной по контуру прижимным кольцом. При решении задачи предполагалось, что материал является упругопластическим, удовлетворяющим соотношениям теории течения с изотропным упрочнением. Показано, что при малых величинах давления (пока нет пластических деформаций) напряженно-деформированное состояние в пластине удовлетворяет гипотезам, принятым в теории изгиба пластин. При появлении и развитии пластической зоны в центральной части пластины напряженное состояние становится существенно неоднородным. Форма и высота купола зависят от радиуса скругления прижимного кольца. Построены зависимости минимальной толщины пластины (в вершине купола) от высоты купола для разных значений коэффициента линейного упрочнения материала. Показано, что при высоте купола до пяти значений первоначальной толщины пластины на эти зависимости слабо влияют величина параметра упрочнения материала и наличие трения на поверхностях контакта.

Проведен технологический эксперимент – пневмоформовка купола из круглой тонкой пластины, закрепленной в жестком фланце, равномерным постоянным давлением при комнатной температуре. Заготовки для получения образцов из материалов: ПОС-61, свинец, сплав Вуда, были предварительно подвергнуты всесторонней кантовке, а затем расплющены и раскатаны в валках в плоские круги. В ходе эксперимента форма и размеры купола определялись с помощью метода фотофиксации. По окончанию пневмоформовки измерялись высота купола и толщина изделия в вершине купола и в нескольких точках по радиусу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-04281).

О ГИПОТЕЗЕ ЛОКАЛЬНОЙ ПРОСТОТЫ ТЕОРИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д.О. Бабаева, И.Н. Молодцов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В теории упругопластических процессов образ процесса нагружения в пятимерном пространстве девиатора деформаций определяется внутренней геометрией траектории деформации и набором скалярных параметров. Для процессов с плоскими траекториями деформации (В.И. Малый) установлено, что из гипотезы локальной простоты в первом приближении можно определить функционал связи между векторами напряжений и деформаций, поскольку в данном случае характеристикой внутренней геометрии траектории является ее кривизна. Результатом является трехчленная формула А.А. Ильюшина.

Для процессов более высокой размерности авторами была получена четырехчленная формула, подробно изученная на процессах с трехмерными траекториями деформаций. Эта формула содержит три функционала состояния, не использует постулатов пластичности, а получена только с учетом теоремы об изоморфизме. В трехмерных процессах сложного нагружения функционалы вычислены через геометрические характеристики траектории деформаций (кривизна и крутка, скалярные параметры) и четырехчленная формула аттестована на винтовых траекториях деформаций.

Показано, что в произвольной точке траектории деформаций пространство деформаций может быть перенормировано при помощи скалярной функции-метрики так, что в ней четырехчленная формула приводится к трехчленной формуле А.А. Ильюшина, а следовательно удовлетворяет гипотезе локальной простоты. Все вышесказанное полностью относится и к процессам нагружения, где проводится аналогичная перенормировка пространства нагружения и с тем же результатом. Это позволяет получить вторую гипотезу локальной простоты, подтвердить теорему об изоморфизме и использовать результаты (Р.А. Васин) по калибровке подобных определяющих соотношений.

О СВЯЗИ МЕЖДУ ФИЛЬТРОМ КАЛМАНА И НАБЛЮДАЕМОСТЬЮ В ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ

Ф.Ю. Бакланов [1], *В.М. Морозов* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Информация о свойствах наблюдаемости линейной системы особенно важна в таких прикладных областях, где имеет место оценка параметров состояния по следующим причинам. Во-первых, ответ на вопрос, является ли система вполне наблюдаемой, позволяет понять, может ли задача быть в принципе решена. Однако на практике в большинстве случаев число доступных измерений оказывается значительно меньше размерности вектора состояния, поэтому соответствующие системы могут быть не вполне наблюдаемы. В данной ситуации понимание того, какие именно комбинации компонент вектора состояния являются наблюдаемыми при движении по различным траекториям, может помочь инженеру «предсказать» поведение фильтра Калмана и порекомендовать проводить специальные маневры для оценки определенных параметров или ошибок

навигационной системы. Получена формула, связывающая решение уравнения Риккати с «взвещенным» грамианом наблюдаемости. Предлагается методология исследования наблюдаемости, которая может быть использована инженерами в прикладных задачах.

ПОСТРОЕНИЕ ИНДЕКСА НА МНОЖЕСТВЕ ТОВАРОВ

А.А. Балуев, М.П. Заплетин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается задача построения товарного индекса на основе позиций, входящих в Thomson/Reuters CRB Inex: нефть, газ, бензин, мазут, алюминий, медь, никель, золото, серебро, кукуруза, соя, скот, хлопок, сахар, кофе, какао, пшеница, апельсиоывй сок, свинина. Цель задачи – описать поведение фьючерсных цен на данные товарные позиции из индекса CRB, оценить их стоимость в построенном индексе, оценить стоимость мировых резервных валют в построенном индексе.

Математическая часть состоит в решении нескольких экстремальных задач в различных функциональных пространствах. Необходимый ответ на задачу получен путем решения экстремальной задачи в пространстве $L_2[t_0, t_1]$, где функции, соответствующие временным рядам цен взяты с весовыми коэффициентами, которые находятся из условий оптимальности. Исходная задача в итоге свелась к конечномерной гладкой задаче без ограничений. Задача решается численно используя градиентный метод.

Результатом решения задачи стал построенный товарный индекс.

Проведены необходимые исследования зависимостей между товарными позициями, входящими в построенный индекс.

Построены модели индекса для отдельных групп товаров: металлов, сельскохозяйственной продукции, продуктов нефтеперерабатывающей промышленности. Проведено исследование зависимости между индексом и долларом США. Все результаты сопровождены необходимыми графиками и иллюстрациями.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ НЕФТИ

Д.Ю. Белова [1,2], *В.Ф. Никитин* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Многофазные потоки в пористых средах исследуются в самых разных областях. В первых работах, посвященных фильтрационным течениям, рассматриваются в основном загрязнения и восстановления грунтов. В настоящее время наиболее актуальны исследования течений смеси нефти, жидкости и газа, направленные на повышение нефтедобычи. Численное моделирование способствует качественному пониманию этих процессов и оценке количественных характеристик.

Характер течения жидкостей, заполняющих нефтеносный пласт, зависит от стадии добычи нефти. На ранней стадии пласт содержит единственную жидкую среду – нефть (наличием воды и газа в начальный момент можно пренебречь). Часто разница атмосферного и пластового давлений настолько высока, что из скважины сразу вытесняется около 15 % углеводородов. Для добычи оставшихся ресурсов используют

различные методы, самый распространенный из которых – заводнение. Добыча ведется при помощи нагнетания в скважину водного раствора, тем самым повышается градиент давления.

Для описания этого процесса используется модель нелетучей нефти Маскета – Мереса (Black oil), в которой предполагается, что в пористой среде одновременно сосуществуют три фазы: вода, нефть и газ. Считается, что вода и нефть не смешиваются, не обмениваются массами, фазовые переходы отсутствуют, а газ растворим в нефти и нерастворим в воде. Также предполагается, что фазы в пласте находятся в состоянии термодинамического равновесия при постоянной температуре.

Более перспективным методом для разработки некоторых месторождений представляется закачка в пласт горячего воздуха. Отличительная особенность его применения заключается в том, что нефть, с одной стороны, оттесняется к добывающим скважинам газами горения, а с другой – повышается ее температура, тем самым уменьшается вязкость. В результате увеличивается средняя скорость вытеснения.

В работе рассматривается двумерная задача вытеснения из пористой среды, учитываются влияния капиллярного эффекта и химических межфазных взаимодействий. Задача решается для трех фаз: жидкой, нефтяной и газовой. Каждая фаза состоит из набора переходящих друг в друга компонент, однако, как и в модели Маскета – Мереса, в представленной постановке не учитываются фазовые переходы, что является значительным упрощением. Фазы имеют свои скорости, давления и насыщенности.

В работе приводятся основные понятия и уравнения модели трехфазного потока в пористой среде; особое внимание уделяется описанию принятых соотношений для определения параметров флюида и твердого скелета. Далее описывается численная модель для определения основных параметров задачи – давления, концентраций, температур. Для численного решения задачи была использована неявная схема. В конце работы приводится результат численного решения и его анализ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-29-15080).

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ В.В. ГОЛУБЕВА К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ПЛЕНОК

А.Н. Белоглазкин, В.Я. Шкадов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Изложен обобщенный метод вывода модельных уравнений для волновых режимов течения в стекающих пленках. Применяются уравнения вязкой жидкости на основе интегральных соотношений пограничного слоя с весовыми функциями. Построена последовательность систем дифференциальных уравнений эволюционного типа с целочисленным параметром n, который задает номер весовой функции. При $n=0$ получается классическая модель IBL (Integral Boundary Layer), при $n\geq 1$ получаются ее модификации, названные моделями WIBL (Weighted Integral Boundary Layer). Выведенные модели независимы между собой и каждое из них может применяться к исследованию волновых режимов в пленке.

Для различных значениях параметра n проведены численные расчеты решений в линейном и нелинейном приближениях. Сопоставление характеристик нелинейных пространственно-периодических и уединенных волновых структур с экспериментальными данными, либо с точными численными решениями соответствующих краевых задач для уравнений Навье – Стокса показало, что для течений пленок на вертикальной и наклонной твердой поверхности, наиболее точные результаты получаются при использовании модели

$n=0$. Все последующие модельные системы, начиная с $n=1$ (метод WIBL), дают лишь качественное соответствие с результатами по методу IBL при значительных количественных ошибках. Как правило, величина ошибки во всех рассмотренных задачах растет монотонно с ростом n. Таким образом, классическая система IBL имеет преимущества по сравнению с системой WIBL.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-05186-а).

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕДУЦИРОВАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.П. Беляев [1], *Т.А. Белякова* [2], , *Ю.П. Зезин* [1] *А.В. Инюхин* [1], *П.А. Моссаковский* [1], *Л.А. Костырева* [1], *П.В. Чистяков* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Проведено компьютерное моделирование специального захвата для проведения экспериментов по вытягиванию слоя ткани в условиях трансверсального сжатия. Дана оценка равномерности распределения давления в устройстве. Проведены эксперименты по сжатию тридцатислойного пакета арамидной ткани полотняного плетения, определен трансверсальный упругий модуль. Проведен ряд альтернативных экспериментов (без использования специального захвата) по определению коэффициентов трения между слоями арамидной ткани полотняного плетения в условиях малой трансверсальной нагрузки (до 50 кгс). Показано хорошее соответствие результатов по обоим методам.

Работа выполнена при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

МЕДЛЕННЫЕ БЕЗНАПОРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ВНУТРИ ВЫСОКОПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Н.А. Беляев, Н.Е. Леонтьев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Изучается медленное (безынерционное) течение тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью внутри высокопористой среды над горизонтальным непроницаемым основанием. Задачи такого рода могут быть интересны в ряде практических приложений (пропитка пористых сред при производстве композиционных материалов и др.).

Течение жидкости описывается законом фильтрации Бринкмана, на нижней границе ставится условие проскальзывания Навье. В качестве эвристической гипотезы на свободной поверхности ставятся (1) условие непрерывности давления (поверхность предполагается пологой, влиянием поверхностного натяжения пренебрегается) и (2) условие для тензора скоростей деформаций, вычисленного по скорости фильтрации, которое формально аналогично условию отсутствия касательных напряжений на свободной поверхности в свободной вязкой жидкости.

Получены уравнение для толщины слоя жидкости, которое оказывается частным случаем нелинейного уравнения теплопроводности, и условие на разрывах. При стремлении толщины слоя к нулю в случае прилипания на дне уравнение асимптотически переходит в известное уравнение течения тонкой пленки вязкой

жидкости, а с ростом толщины слоя уравнение асимптотически переходит в уравнение Буссинеска для пологой безнапорной фильтрации в рамках закона Дарси (Кочина, 1977).

Для плоских течений строятся простейшие аналитические решения (решение в виде бегущих волн; автомодельное решение, описывающее течение от источника).

Находятся асимптотические разложения решений в окрестности передней границы растекающейся жидкости (точки касания свободной поверхности и подстилающей поверхности). В случаях прилипания и проскальзывания показатели степени в разложениях толщины пленки как функции от расстояния до передней границы растекающейся жидкости (в рамках принятой модели) оказываются различными (соответственно 1/3 и 1/2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 17-01-00037).

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРАНСЗВУКОВОГО ПЕРЕХОДА В КАНАЛАХ ТИПА СОПЛО ЛАВАЛЯ

А.Н. Богданов

НИИ механики МГУ, Москва

Моделирование трансзвукового перехода в сопле Лаваля относится к числу классических задач околозвуковой аэродинамики. В условиях современного развития вычислительных ресурсов эта проблема остается достаточно сложной и важно, что для этапов процесса перехода имеются аналитические модели, могущие выступать тестовыми для отладки пакетов прикладных программ расчета сложных течений с переходом через скорость звука.

Проведенное ранее аналитическое моделирование трансзвукового перехода в виде последовательности стационарных картин [1] оставляло вопросы в связи с тем, что имеющиеся аналитические модели, описывающие предварительные для трансзвукового перехода в канале режимы (течение Тейлора) и режимы уже состоявшегося перехода (течение Мейера), имеют принципиально различную топологию.

Понимание особенностей процесса послужит созданию условий для осуществления расчетных (предотвращению развития негативных) режимов трансзвукового перехода в газовой динамике.

Литература

1. *Рыжов О.С.* Исследование трансзвуковых течений в соплах Лаваля // *О.С. Рыжов.* – М., Изд-во ВЦ АН СССР, 1965.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ОТРЫВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

В.В. Боголепов [1], *И.К. Ермолаев* [2], *Л.Д. Сухановская* [3]

[1]ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.;
[2]НИИЯФ МГУ, Москва;
[3]НИИ механики МГУ, Москва

Интерес к исследованиям течений в следе, которые оказывают влияние на донное сопротивление и общую структуру обтекания тела вращения, сохраняет свою

актуальность. В работе рассмотрена возможность управления донным сопротивлением, поиск оптимальных способов тепломассоподвода и рациональных конструктивных схем его реализации с целью получения донной тяги, когда процесс горения переносится из донной области тела вращения на его боковую поверхность, примыкающую к донному срезу.

Разработан способ генерации донной тяги с использованием донных тепловых газогенераторов (ДТГ) нетрадиционной конструктивной схемы (с отделяющимся дном). Экспериментальные исследования проведены на аэродинамической установке А-3 при числе Маха $M_1 = 3$. Установлено, что при вдуве пылевой плазмы, образующейся при горении оксидно-металлического порошкового композита на основе окиси ниобия, в донную область и наличии отделяющегося дна (плоская металлическая пластина) наблюдается увеличение донного давления в 4,1 раза по сравнению со статическим давлением. При горении композита образующаяся пылевая плазма занимает все донное пространство, выходя из области, ограниченной линиями стекания, что приводит к реализации течения, когда зона отрыва объединяется с зоной рециркуляции в донной области, т.е. реализуется донная тяга. С целью увеличения зоны рециркуляции проведен эксперимент на усовершенствованной модели ДТГ с отделяющимся дном в виде параболоида (цилиндр, торцевая поверхность которого выполнена в виде параболоида). Донное давление в этом случае составляет 29,3 % от статического давления набегающего потока.

Таким образом, показано, что для создания донной тяги возможность использования пылевой плазмы является перспективным направлением и существуют резервы увеличения донного давления за счет дальнейшего совершенствования газодинамической схемы ДТГ с отделяющимся дном.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-07687).

О ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА СИСТЕМУ «ИМПЛАНТАТ – КОСТНАЯ ТКАНЬ»

А.В. Бойко [1], *В.В. Зуев* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Московский технологический университет, Москва

На основе определяющих соотношений, предложенных одним из авторов для сред с усложненными свойствами, построена математическая модель и создано прикладное программное обеспечение, позволяющее рассматривать различные динамические, в частности, ударные воздействия на человека, разнообразные биоконструкции, защитные преграды и т.п.

Данный подход позволяет иметь информацию о значениях любых кинематических и динамических величин в любых точках изучаемой системы в любой момент времени для различных динамических нагружений, что выгодно отличает его от существующих экспериментальных и приближенных теоретических методов.

В докладе особое внимание уделяется динамическому воздействию на систему «имплантат – костная ткань». Дана математическая модель процесса, приведены результаты расчета разнообразных вариантов нагружений, показаны значения деформаций и напряжений в системе, перемещения имплантата в различных характерных точках, динамика зон разрушения и т.п. Все это позволяет прогнозировать возможные процессы деформирования и разрушения и существенно сократить расходы на дорогостоящие экспериментальные исследования.

О РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА КРЕЙГА – БЭМПТОНА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ УПРУГИХ

В.Г. Бойков [1], *И.В. Гаганов* [2,3], *В.Ан. Левин* [2], *А.А. Юдаков* [1]

[1]ЗАО «АвтоМеханика», Москва;
[2]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;
[3]ООО «Fidesys», Москва

В классической механике уравнения движения системы тел описываются в предположении, что каждое тело системы не подвержено упругим деформациям и совершает движение как абсолютно жесткое тело.

В данной работе предлагается учитывать возможные колебания и деформации, возникающие во время движения системы.

Уравнения движения упругого тела выводятся в предположении, что оно совершает движение в составе механической системы и подвержено малым упругим деформациям. Для решения данной задачи используются классический метод конечных элементов (МКЭ) и редукция модели методом Крейга – Бэмптона.

Все это реализовано с помощью интеграции пакетов Fidesys и Euler.

При решении использовались языки C++ и Python, использовались технологии Intel, а так же API Fidesys для автоматизации расчетов.

Данная интеграция позволяет решать задачи со всеми типами элементов: балочные, оболочные и трехмерные элементы.

Исследования для данной работы были проведены в ООО «Fidesys» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской федерации (проект № 14.579.21.0112, ID проекта RFMEFI57915X0112).

О ДОСТИЖИМОЙ ТОЧНОСТИ И НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ВЕКТОРНОЙ АЭРОГРАВИМЕТРИИ

Ю.В. Болотин, В.С. Вязьмин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Работа посвящена векторной аэрогравиметрии на основе бескарданных инерциальных навигационных систем. Под векторной аэрогравиметрией понимается одновременное вычисление всех трех компонент вектора возмущения силы тяжести (ВСТ) на траектории, используя измерения с борта летательного аппарата. Исследования по векторной аэрогравиметрии ведутся разными авторами с 1990-х гг. Для векторной гравиметрии требуется существенно более точная элементная база, чем для скалярной аэрогравиметрии. Основная трудность при построении алгоритмов оценивании вектора возмущения состоит в отделении горизонтальных компонент ВСТ от инструментальных, геометрических погрешностей инерциальных датчиков. Иными словами, задача ненаблюдаема и требует регуляризации.

В докладе проводится качественный анализ решений задачи векторной аэрогравиметрии, основанных на разных гипотезах о векторе ВСТ. Выделены два подхода, использующих схожую дополнительную информацию и потому допускающих сравнение. Первый подход, предложенный К. Джекели, предполагает наличие повторных галсов съемки. В его основе неявно лежит гипотеза о низкочастотном характере ВСТ. Он состоит

в грубом оценивании ВСТ на каждом галсе и последующей декорреляции данных на повторных галсах. Второй, новый подход использует гармоничность ВСТ (Ю.В. Болотин, В.С. Вязьмин). Он основан на локальных детерминированных гармонических моделях ВСТ, в основу которых положено сферическое скейлинг- и вейвлет-разложения ВСТ. Задача векторной аэрогравиметрии при этом ставится как задача оценивания скейлинг-коэффициентов совместно с параметрами инструментальных погрешностей инерциальных датчиков. В качестве корректирующей информации используются скоростные решения СНС. Предположение гармоничности позволяет учитывать корреляцию между данными на смежных профилях, не вводя стохастических гипотез о ВСТ.

В докладе проводится сравнение подходов на основе спектрального анализа. Для приведения нестационарной задачи к стационарной применена специальная процедура осреднения. После этого сравнение ведется на языке спектральной плотности мощности ошибок оценки ВСТ. Приведены численные результаты, показывающие существенные преимущества последнего подхода. Улучшение качества оценки обусловлено, по-видимому, учетом гармоничности ВСТ. Показано, что важным условием, оказывающим заметное влияние на точность оценок горизонтальных компонент ВСТ, является требование динамичного полета на галсе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00731).

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ФЛАТТЕР УПРУГИХ ПЛАСТИН ПРИ МАЛЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

В.О. Бондарев, В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ, Москва

Исследуется устойчивость бегущих волн на поверхности упругой пластины, обтекаемой с одной стороны плоскопараллельным сверхзвуковым потоком сверхзвукового совершенного газа. Подобные задачи изучались в ряде работ по панельному флаттеру, где поток считается однородным. В текущей работе газ предполагается вязким, на поверхности имеется пограничный слой с полем скорости и температуры, которые считаются заданными. Задача решается в плоской постановке. Течение считается ламинарным.

Уравнение движения пластины описывается уравнением Кирхгофа – Лява для случая малых прогибов пластины.

В первой части работы исследуются невязкие возмущения, т.е. число Рейнольдса считается бесконечно большим. Такие возмущения описываются уравнением Рэлея. Пластина имеет вид бесконечной плоскости.

Во второй и основной части работы аналитически исследуется влияние вязких возмущений пограничного слоя на устойчивость упругой пластины, в случае больших, но конечных чисел Рейнольдса. Для получения дисперсионного уравнения используется метод ВКБ-решений.

В случае невязких возмущений вычислены зависимости скорости роста возмущений от толщины пограничного слоя для различных длин волн для обобщенно-выпуклого профиля скорости и для профиля скорости с обобщенной точкой перегиба. Для обобщенно-выпуклых профилей пограничного слоя увеличение толщин пограничного слоя ведет к увеличению частот растущих возмущений и уменьшению их скорости роста возмущений.

Для профилей скорости с обобщенной точкой перегиба увеличение толщины пограничного слоя ведет сначала к увеличению скорости роста возмущений, причем

увеличивается диапазон частот, при которых происходит рост возмущений. При дальнейшем увеличении толщины пограничного слоя скорость роста возмущений стремится к нулю, однако, все равно остается положительной.

В случае вязких возмущений при больших числах Рейнольдса получено дисперсионное уравнение, описывающее поведение возмущений. Исследовано аналитически поведение длинноволновых возмущений для различных случаев фазовых скоростей. Для растущих длин волн (в невязком случае), когда $0 < c < \mathrm{M} - 1$, где c – фазовая скорость, M – число Маха, при малых толщинах пограничного слоя вязкие возмущения всегда оказывают дестабилизирующий эффект. Однако при больших толщинах пограничного слоя вязкие возмущения, в зависимости от параметров течения, могут оказывать как стабилизирующий, так и дестабилизирующий эффект.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ № МК-5514.2016.1).

О ВЛИЯНИИ РАССОГЛАСОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ФАЗ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ

С.А. Боронин

НИИ механики МГУ, Москва;
Сколковский институт науки и технологий, Москва

В рамках модели взаимопроникающих континуумов проведено исследование гидродинамической устойчивости течения запыленного газа в вертикальном канале. В основном течении рассогласование скоростей фаз вызвано гравитационным осаждением частиц, концентрация частиц распределена неоднородно по ширине канала. Определяющими параметрами задачи являются число Рейнольдса, параметр инерционности частиц и число Фруда. Линеаризованная система уравнений сведена к модифицированному уравнению Орра-Зоммерфельда для возмущений в виде бегущих волн. Рассмотрен предельный случай малых чисел Фруда и аналитически показано, что в этом случае влияние частиц сводится к уменьшению инкремента нарастания волн во всем диапазоне остальных определяющих параметров. В предельном случае больших значений числа Фруда постановка задачи соответствует течению в горизонтальном канале без учета силы тяжести.

Численное решение уравнения Орра – Зоммерфельда проведено при помощи метода ортогонализации. Ввиду наличия особенности в уравнении относительно возмущения концентрации частиц, зависимость инкремента нарастания от волнового числа имеет разрыв в окрестности нулевого инкремента нарастания. На основе численных расчетов получено, что в определенной области определяющих параметров (при достаточно малых значениях чисел инерционности и Фруда) дисперсная примесь полностью стабилизирует течение. При приближении к границе этой области по числу Фруда при фиксированном числе инерционности нейтральная кривая становится замкнутой и область неустойчивости полностью исчезает. Указанная область устойчивости потока в плоскости числа Фруда и числа инерционности построена как для нисходящего, так и для восходящего течения дисперсной примеси в вертикальном канале.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00057).

О ПОДХОДАХ К ПОСТРОЕНИЮ НОВЫХ ТЕНЗОРНЫХ МЕР ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Г.Л. Бровко

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В учебниках и учебных пособиях по механике сплошной среды, в исследованиях по механике деформируемых сред и ее разделам используются различные тензорные меры деформаций и напряжений, в основном классического типа.

Первые подходы к построению неклассических тензорных мер деформаций и напряжений были предложены Сетхом и продвинуты Хиллом. Признание получили логарифмический тензор деформаций Генки, тензоры скоростей деформаций разных порядков – тензоры Ривлина – Эриксена.

В отечественных исследованиях пластичности при конечных деформациях в 1980-е гг. использовалась логарифмическая мера Генки, была введена и использовалась скоростная тензорная мера конечных деформаций, был обозначен «исчерпывающий» набор семи пар сопряженных тензорных мер.

В докладе представлена классическая теория тензорных мер напряжений и конечных деформаций. На основе аддитивных тензоров растяжений и поворотов рассмотрены известные случаи малых движений: малые деформации, малые дисторсии, классический случай «малых деформаций», а также особый случай малых поворотов и больших деформаций. Приведены известные тензорные меры напряжений, используемые в теории конечных деформаций. Представлены общие приведенные формы определяющих соотношений классических сплошных сред: соотношения Нолла, Ильюшина, Пиолы – Кирхгофа первого и второго рода.

На основе выбора простых диаграмм объективных тензоров и соответствующего вида объективных производных и объективных интегралов построена обобщенная теория тензорных мер деформаций и напряжений в классической механике сплошной среды: предложены основные аксиомы теории, получены общие формулы для новых тензорных мер, установлена теорема об энергетической сопряженности мер напряжений и деформаций, выделяющая полный лагранжев класс мер. В качестве подкласса построен простой лагранжев класс энергетически сопряженных мер напряжений и конечных деформаций, в котором выделены семейства голономных и коротационных мер. Сравнением тензорных мер простого лагранжева класса друг с другом и с логарифмическими мерами исследованы характеристики голономных и коротационных мер. Установлена замкнутость простого лагранжева класса и его семейств относительно выбора порождающей пары энергетически сопряженных мер. Отмечены приложения новых тензорных мер в моделировании свойств пластичности, вязкоупругости, памяти формы.

Определяющее влияние диаграмм на тензорные меры напряжений и деформаций, а тем самым на механические свойства моделей деформируемых тел, выраженных в терминах этих мер, предоставляет широкие возможности для аппроксимации экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00669).

МОДЕЛЬ ОСНАЩЕННОГО СТЕРЖНЯ С ВЯЗКОУПРУГИМИ ВНУТРЕННИМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

Г.Л. Бровко [1], *О.А. Иванова* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]АО «Концерн радиостроения «Вега», Москва

Рассмотрена построенная с использованием метода механического моделирования, предложенного А.А. Ильюшиным, модель оснащенного стержня типа Коссера с вязкоупругими (модель Кельвина – Фойгта) свойствами в отношении моментных взаимодействий между несущим стержнем и системой массивных включений. Изучены собственные колебания такой конструкции при различных значениях коэффициента вязкости. Установлено наличие четырех комплексных частот таких колебаний. С помощью численных исследований показано, что мнимые части этих частот положительны, что приводит к непременному затуханию собственных колебаний конструкции. Выявлена связь между скоростью полного затухания и значением коэффициента вязкости. Приведены графики, иллюстрирующие процесс затухания в различных модах колебаний и для различных значений коэффициентов вязкости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00669).

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОРИСТЫХ НАПОЛНЕННЫХ СРЕДАХ ПРИ МАЛЫХ И КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ КАРКАСА

Г.Л. Бровко, И.О. Фасхеев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В докладе представлены постановка и численное решение задачи о поперечном протекании сжимаемой жидкости сквозь твердый деформируемый пористый каркас конечной толщины в случае конечных деформаций каркаса. Решение представлено в двух случаях: для постоянной проницаемости каркаса и для переменной, вычисляемой по формуле Козени – Кармана.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00669).

О СТАЦИОНАРНЫХ ДВИЖЕНИЯХ СИСТЕМЫ ШАРНИРНО СВЯЗАННЫХ ВОЛЧКОВ ЛАГРАНЖА

Д.А. Бровченко, А.В. Карапетян

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В работе рассмотрена задача о движении двух динамически симметричных тел, соединенных идеальным сферическим шарниром; одно из двух тел имеет неподвижную точку, а система находится в однородном поле силы тяжести.

Выписаны уравнения движения системы и ее первые интегралы: интеграл энергии и три Нетеровых интеграла. Найден эффективный потенциал задачи – минимум энергии по угловым скоростям на фиксированных уровнях Нетеровых интегралов. Известно, что критическим точкам этого потенциала соответствуют стационарные движения системы.

Исследован ряд свойств, которым должны удовлетворять стационарные движения. Выписаны условия стационарности эффективного потенциала и в явном виде найдены некоторые частные решения этих уравнений. Кроме того, исследована устойчивость стационарных движений, соответствующих найденным решениям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00338).

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ К ПОВЕРХНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ

И.Г. Брыкина

НИИ механики МГУ, Москва

В задаче трехмерного гиперзвукового безотрывного обтекания тел при больших и умеренных числах Рейнольдса, соответствующих наиболее теплонапряженной части траектории входа космических аппаратов и метеороидов в атмосферу, получены аналитические выражения для теплового потока, отнесенного к его значению в точке торможения, зависящие только от геометрических параметров, инвариантных относительно выбора системы координат. Эти формулы получены путем решения уравнений тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС) для совершенного газа разработанным приближенным асимптотическим методом. Оценена точность аналитических решений путем сравнения с численными решениями уравнений ТВУС. Получены имеющие более широкую область применимости, чем модель ТВУС, выражения для относительного теплового потока, зависящие от инвариантных геометрических параметров и давления, согласующиеся с численным решением уравнений Навье – Стокса.

Проведены сравнения с численными решениями уравнений ТВУС для многокомпонентного химически реагирующего газа для высот от 90 до 50 км траектории входа в атмосферу космического аппарата Space Shuttle. Показано на основании сравнений, что относительный тепловой поток на идеально каталитической поверхности слабо зависит от характера протекания химических реакций в ударном слое, включая замороженные, химически неравновесные и околоравновесные режимы течения, и хорошо описывается полученными формулами не только для поверхности с постоянной температурой, но и для равновесно излучающей. Таким образом, при знании теплового потока в точке торможения сферы полученные формулы позволяют рассчитать тепловой поток к идеально каталитической поверхности трехмерных затупленных тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком химически реагирующего газа.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОВОЙ КРИВОЙ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА

И.Г. Брыкина, Г.А. Тирский

НИИ механики МГУ, Москва

В последние годы, особенно после Челябинского события 15 февраля 2013 г. и появления в литературе большого объема наблюдательных данных по этому событию, возрос интерес исследователей к явлению входа естественных космических тел в атмосферу Земли. На основании анализа и обработки наблюдательных данных определена траектория полета Челябинского метеороида, по ряду видеозаписей построены световые

кривые, проведены оценки диаметра и материала метеороида, выделившейся энергии и высоты максимального энерговыделения.

В работе рассматриваются вход и взаимодействие с атмосферой Земли крупного метеороида, когда он движется как единое тело и как облако осколков, объединенных с единой ударной волной. С использованием литературных данных получена формула для коэффициента радиационной теплопередачи для метеороида, моделируемого сплюснутым эллипсоидом вращения, в зависимости от его скорости, размера, плотности атмосферы и коэффициента сплющенности. Проведена оценка областей преобладающего влияния конвективных и радиационных тепловых потоков. Получено выражение для коэффициента лобового сопротивления для эллипсоидов вращения. В предположении, что масса метеороида убывает быстрее, чем его скорость, получены аналитические решения уравнений физической теории метеоров с полученными коэффициентами для крупного метеороида эллиптической формы для изменения его массы, профиля световой кривой и высоты основного энерговыделения. Показана хорошая точность этого решения на основе сравнения с численным решением уравнений физической теории метеоров для сферы. Предложена модель фрагментации метеороида, рассматривающая его как облако осколков с промежутками между фрагментами, заполненными парами, которое расширяется в поперечном движению направлении и сжимается в продольном (сплющивается) под действием аэродинамических напряжений со скоростью, меняющейся вдоль траектории и зависящей от степени сплющивания.

Рассмотрено взаимодействие с атмосферой Челябинского метеороида с использованием предложенной модели фрагментации и найденных решений, проведено моделирование его световой кривой (профиля энерговыделения) и изменения массы вдоль траектории. Оценено влияние определяющих параметров на характеристики взаимодействия метеороида с атмосферой Земли. Показано хорошее согласование аналитического решения для относительной яркости Челябинского болида (нормированной на максимальное значение на высоте основной вспышки) с наблюдательными данными – световыми кривыми, построенными по разным видеозаписям.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ С МЕДЬЮ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

И.А. Брюханов

НИИ механики МГУ, Москва

Методом молекулярной динамики изучен механизм и скорости зарождения петель частичных дислокаций вблизи зон Гинье – Престона разного диаметра. Полученные скорости зарождения дислокаций аппроксимированы в аррениусовской форме. Получены зависимости скорости движения дислокации от сдвигового напряжения.

На основе проведенных молекулярно-динамических расчетов построена модель релаксации сдвиговых напряжения в сплавах алюминия с медью, которая учитывает зарождение и распространение дислокационных петель, увеличивающих свою длину при движении. Модель включает в себя соотношение Орована для скорости пластической деформации, кинетическое уравнение изменение плотности дислокаций и закон Гука. Показано, что с учетом рассмотренных механизмов пластической деформации при сдвиговом напряжении до 0,8 ГПа процессы размножения дислокаций за счет распространения доминируют над процессами зарождение дислокаций как в гомогенном объеме, так и вблизи зон Гинье – Престона. При напряжениях выше 0,8 ГПа происходит смена механизмов. Из-за смены механизмов изменяется зависимости времени релаксации от температуры: до 0,8 ГПа

время релаксации возрастает с ростом температуры, а при значениях выше 0,8 Гпа – наоборот, убывает. Получены зависимости скорости пластической деформации от напряжения и температуры при различных значения пластической деформации. Показано, что при начальной плотности дислокаций 10^{10} м$^{-2}$ скорости пластической деформации выше 10^{6}-10^{7} с$^{-1}$ могут достигаться только за счет процессов зарождения дислокаций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-31-00478 мол_а).

ОСОБЕННОСТИ ГРАНИЦ ОБЛАСТЕЙ ДОСТИЖИМОСТИ В СИСТЕМАХ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Д.И. Бугров [1], *А.М. Формальский* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В докладе рассматривается линейная стационарная система третьего порядка с одним управляющим (возмущающим) воздействием, ограниченным по абсолютной величине. Изучается случай, когда система имеет одно действительное и два комплексно-сопряженных собственных значения. Граница области достижимости такой системы в любой конечный момент времени имеет две конические угловые точки. Характер этих угловых точек и их «поведение» с изменением времени зависит от соотношения между действительным собственным значением и действительной частью комплексно-сопряженных. Изучается поведение границы области достижимости системы в окрестности угловых точек с ростом времени. Если действительное собственное значение меньше действительной части комплексно-сопряженных, то углы раствора конусов, охватывающих угловые точки, с ростом времени растут, и при стремлении времени к бесконечности угловые точки «разглаживаются». В случае, когда действительное собственное значение равно действительной части комплексно-сопряженных, углы раствора конусов, охватывающих угловые точки, с ростом времени остаются без изменения; эти углы удается найти аналитически. Наконец, в последнем случае, когда действительное собственное значение превосходит действительную часть комплексно-сопряженных, эти конусы с ростом времени, начиная с некоторого момента, остаются без изменения.

Разработана программа, позволяющая строить области достижимости в трехмерном пространстве численно. При помощи этой программы построены области достижимости в указанных выше случаях для некоторых конкретных значений параметров системы. Соответствующие иллюстрации приведены в докладе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-04503).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ ПЛОТНОЙ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,55 мкм

Н.Г. Быкова, К.С. Гочелашвили, И.Е. Забелинский, Д.М. Карфидов, Г.Ф. Макаренко, А.К. Сенаторов, К.Ф. Сергейчев, О.П. Шаталов

НИИ механики МГУ, Москва

Проведено исследование прозрачности воздушной плазмы для лазерного излучения на длине волны 1,55 мкм. Экспериментально показано, что в диапазоне концентраций

электронов $2 \cdot 10^{12}$-$4 \cdot 10^{14}$ $см^{-3}$, плазма, создаваемая ударной волной, полностью прозрачна для лазерного инфракрасного излучения на длине волны 1,55 мкм. Следовательно, можно ожидать, что на всех траекториях спуска современных космических аппаратов устойчивая связь с ними на длине волны 1,55 мкм может быть установлена при различных скоростях спуска. Одновременно показано, что при концентрации электронов выше 10^{12} $см^{-3}$ плазма не прозрачна для излучения СВЧ-сигнала (частота излучения 40 ГГц).

Эксперименты выполнялись на ударной трубе с внутренним диаметром 50 мм. В процессе эксперимента ударная волна, проходящая мимо смотровых окон, просвечивается лучом полупроводникового лазера непрерывного действия с длиной волны 1,55 мкм, а также излучением от непрерывного СВЧ источника частотой 40 ГГц. Пройдя через ударную трубу, луч лазера попадает в приемный тракт и затем по оптоволокну на германиевый диод ЛФД-2, используемый в качестве приемника. Сигнал, пропорциональный фототоку, регистрируется на цифровом осциллографе. Зондирующее СВЧ-излучение от генератора Г4-30 проходит или отражается от плазмы ударной волны. Сигналы прошедшего сквозь плазму СВЧ-излучения попадают на диод и регистрируются осциллографом. СВЧ-излучение, отраженное от плазмы ударной волны, также регистрировалось диодным детектором. Все сигналы лазерного и СВЧ-излучения совместно обрабатывались на персональном компьютере. Скорость ударной волны регистрировалась датчиками давления, точность измерения скорость составляла 1 %.

По результатам серий измерений, выполненных при начальном давлении газа 9 и 2 Торра, построены графики плотности плазмы в ударной волне и ее относительной прозрачности для прохождения лазерного и СВЧ-излучения в зависимости от скорости ударной волны.

Результаты выполненных в работе экспериментов показали способность когерентного лазерного излучения проходить сквозь плазму, идентичную плазменному слою вокруг спускаемого аппарата с высокой плотностью и высокой частотой столкновений электронов. В работе экспериментально показано, что надежная лазерная связь на телекоммуникационной длине волны 1,55 мкм может быть установлена с детектором, экранированным слоем плотной воздушной плазмы с концентрацией электронов 10^{12}-10^{14} $см^{-3}$. Полученный результат может служить основой для решения задачи установления надежной связи космического аппарата с наземными станциями или навигационными спутниками на всей траектории спуска аппарата в атмосфере Земли.

ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ВЯЗКОУПРУГОСТИ В БИОМЕХАНИКЕ

В.В. Вакулюк

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Работа в основном носит обзорный характер и посвящена анализу использования теории вязкоупругости при решении задач биомеханики.

Математическая теория термовязкоупругости активно разрабатывалась во второй половине XX в. Большой вклад в ее развитие внесли российские ученые Б.Е. Победря, А.А. Ильюшин, Ю.Н. Работнов, П.М. Огибалов, И.И. Бугаков, В.В. Москвитин, Н.И. Малинин, М.А. Колтунов, А.Р. Ржаницин, А.С. Кравчук, М.И. Розовский, Д.Л. Быков, Н.Х. Арутюнян и многие другие. Данный аппарат с конца прошлого века начал активно использоваться в биомеханике для описания явлений с учетом как естественного старения или роста живых организмов, так и, из-за необходимости учета временной составляющей, при описании механических задач деформирования с биологическими материалами.

Классическими примерами биологических тканей, проявляющих вязкоупругие свойства, являются: костная ткань, кожа и подкожные ткани, сосуды, кровь, мышцы, зубы, глаз. При этом для описания механического поведения биотканей при разном напряженно-деформированном состоянии можно использовать разные по сложности модели, учитывающие те или иные особенности. Например, учет неоднородности структуры тканей, в частности моделирование сплошной среды как слоистого или волокнистого композита. Или учет нелинейности геометрической (большие деформации и углы) или физической (в определяющих соотношениях между деформациями и напряжениями).

Из современных российских ученых, работающих в области биомеханики, стоит отметить научные школы из Москвы, Перми, Екатеринбурга, Волгограда, Нижнего Новгорода, Санкт-Петербурга. Широкий спектр решаемых задач – от статических в простейших одномерных постановках до сложных нелинейных трехмерных, решаемых численно. Также рассматриваются задачи прочности и устойчивости, динамические задачи, задачи роста и старения, прямые и обратные задачи.

АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ СЪЕМКИ ЗАДАННЫХ УЧАСТКОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

И.А. Варламова [2], *М.П. Заплетин* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2] Российский университет дружбы народов, Москва

Рассматривается задача автоматизации выбора зон съемки для комплекса планирования. Комплекс планирования представляет собой программное обеспечение для создания и редактирования рабочей программы космического аппарата на интервал в один день. Изучаются возможности ускорения процесса выбора.

Зоны съемки представляют собой многоугольники на двумерной проекции земной поверхности WGS-84. Для работы с зонами съемки на проекцию нанесены также точки витков космического аппарата. Алгоритм предоставляет возможность работы с зонами съемками несколькими способами. Во-первых, можно получить данные об интервале времени, за который полностью покроется конкретная зона съемки. Во-вторых, получить хороший выбор зон съемки за заданный интервал в один день. Вторая функция достигается введением функционала, который учитывает приоритет каждой заявки, а также площадь покрытой съемки. После формирования функционала, решается задача поиска его максимума.

В качестве рабочего материала используется комплекс текущего планирования для космического аппарата Канопус-В-ИК, разрабатываемый АО «Корпорация «ВНИИЭМ». В изучаемой среде используются пеленг и инфракрасная съемка. Задача решается для двумерного представления поверхности Земли в проекции WGS-84. В качестве входных параметров выступают интервал времени и начальные условия. Начальные условия включают время UTC+3 и фазовый вектор на данный момент времени (координаты и скорость космического аппарата) в гринвичской системе координат (ГСК). Для получения точек витков проводится интегрирование начальных условий методом Рунге – Кутты 7(8) с весовыми коэффициентами Дормана – Принса. Координаты многоугольников, представляющих собой заявки на съемки, выгружаются из базы и также наносятся на проекцию. Далее применяется описываемый алгоритм, дающий на выход координаты зон съемок, а также всю справочную информацию (время начала, длительность, координаты космического аппарата на момент начала съемки). После описанных

процедур, полученные зоны съемки можно редактировать при необходимости и сформировать рабочую программу, которая сохраняется в базе заказчика.

Данный алгоритм реализован на языке программирования Java и может быть использован для дальнейших проектов предприятия.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИАС «ИСТИНА» В СВЕТЕ ЗАДАЧ ПО ПОДГОТОВКЕ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

В.А. Васенин

НИИ механики МГУ, Москва

Как и любая сложная, динамичная во времени и открытая система, научно-техническая и образовательная сфера деятельности в обществе без наличия каких-то регулирующих (управляющих) механизмов предрасположена к хаотичному развитию. К числу таких факторов в первую очередь относятся социальные, экономические и политические. В связи с тем, что наука и образование в значительной степени определяют темпы роста национальной экономики, ведущие государства мира уделяют особое внимание механизмам регуляции и управления этой сфере. Влияние социальных, политических факторов может способствовать развитию науки и образования и наоборот. В качестве примеров развития под влиянием таких факторов в XX веке можно привести Германию (1930-1940-х гг.), СССР (1940-1960-х гг.), США (1960-1990-х гг.). Особую значимость при этом на фоне механизмов регулирования приобретает и саморегуляция (самоорганизация). К числу базовых механизмов подобной регуляции в XX в. относились: конкурсное избрание на научные и преподавательские должности; оценка результатов работы и оплата за труд; социальные льготы. Однако их реализация велась без учета оперативного получения, обработки и анализа информации, характеризующей эффективность деятельности отдельного работника.

Механизмы регуляции и саморегуляции процессов в науке и образовании в XXI в. осуществляются на основе современных технологий «Информационного общества» [1]. Они включают: библиометрию (WoS, Scopus, РИНЦ); наукометрию, которая основывается на библиометрии, механизмах анализа и оценки эффективности инновационной деятельности, прикладных исследований, участия в подготовке кадров на актуальных научных направлениях. Системы, использующие такие механизмы регулирования и самоорганизации, именуются Current Research Information System – CRIS (RURE, SeiVal/Elsevier, Converis/Thomson Reuters). К числу систем подобного назначения и функциональных возможностей относится ИАС «ИСТИНА» – Интеллектуальная Система Тематического Исследования НАукометрической информации (далее – Система).

Методологические, архитектурные и технологические принципы, на которых построена эта Система, с полным основанием позволяет отнести ее к категории сложной Big Data-системе, которая интегрирует знания о Наукометрии, как проблемной области. Базовые положения формального описания интеграционных механизмов Системы основываются на интеграции данных и интеграции приложений.

Интеграция данных поддерживает: создание единого нормативно-справочного описания объектов (тезаурус), с которыми «имеют дело» отдельные подсистемы (приложения); установление отношений между объектами (таксономии) для реализации функций, которые определяются назначением отдельных подсистем (приложений).

Интеграция приложений в режиме «облачной архитектуры» доступа к данным обеспечивается с помощью программных механизмов СУБД ORACLE.

Основные проблемные вопросы, которые появились у пользователей в ходе эксплуатации Системы по назначению в 2014-2016 гг., следующие.

- Отсутствие оперативности в получении, неполнота или ошибки в данных по педнагрузке, которые отображаются в ИАС «ИСТИНА».
- Нестыковка индикаторов в различных традиционных отчетных материалах.
- Отсутствие механизмов более «тонкой» настройки временных интервалов, на которых оценивается деятельность работников при конкурсном отборе на поощрительные надбавки и при избрании на должности.
- Нестыковка индикаторов в ИАС «ИСТИНА» и АИС «Педнагрузка» по их функциональному назначению, отсутствие возможности их сверки.
- Недостаточная надежность и точность механизмов автоматической верификации данных, которая используется в ИАС «ИСТИНА».

Для разрешения перечисленных проблемных вопросов перед группой разработки и сопровождения ИАС «ИСТИНА» стоят следующие задачи.

- Доработка онтологии проблемной области (Наукометрия, тезаурус, таксономия, интеграционные механизмы СУБД и подсистемы) с учетом вновь поступивших запросов пользователей.
- Поиск адекватной по функциональным возможностям СУБД ORACLE интеграционной платформы Системы и начало работ по переходу на новую платформу.
- Завершение работ по сопроводительной документации Системы.
- Подготовка перечня показателей деятельности, необходимых при сборе информации для Годового отчета, которые покрывали бы потребности автоматического формирования других крупных традиционных отчетов.
- Более «тонкая» (детальная) настройка механизмов выбора индикаторов из профессионального профиля работника для расчета рейтинговых показателей по формуле, включая:
  - · статьи – тезисы – труды конференций в сборниках;
  - · временной интервал, структура рейтинговой формулы и индикаторы, которые используются в ней, для оценки эффективности деятельности работника при подготовке документов на конкурсное избрание на должности и стимулирующих надбавок;
  - · оперативное поступление информации в ИАС «ИСТИНА» и ее верификация;
  - · совершенствование форм организационно-административного сопровождения процессов создания, утверждения и публикации рейтинговых формул на факультетах, в институтах, центрах;
  - · совершенствование формальных моделей, алгоритмов и программных механизмов оценки соответствия (верификации) вводимых пользователями данных, которые могут иметь неоднозначную трактовку (дубликаты по авторам, библиографическим данным, конференциям);
  - · совершенствование способов модификации модели (онтологии) наукометрии, как проблемной области, включая создание механизмов генерации новых и регенерации уже существующих моделей (в том числе под новые приложения – подсистемы);
  - · разработка подходов к созданию единой для организации в целом информационно-аналитической среды автоматизированного сопровождения процессов обучения.

О ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Р.А. Васин

НИИ механики МГУ, Москва

Проблема построения определяющих соотношений, учитывающих скоростную чувствительность материала, является актуальной. Анализируются некоторые подходы к решению этой проблемы в рамках основных гипотез классической теории течения. Отмечается, что при попытке формально включить скорость пластической деформации в уравнение поверхности нагружения необходимо принимать ту или иную дополнительную гипотезу (предположение) при рассмотрении условия непрерывности изменения поверхности нагружения в процессе деформирования материала. Простейшим и широко используемым в теории обработки металлов давлением является подход, в котором тензорный вид определяющих соотношений принимается таким, как в теории Сен-Венана, а скоростная чувствительность материала учитывается при формулировке скалярных свойств (т.е. в выражении для интенсивности напряжений, которое может быть разного уровня сложности). Отдельно рассматривается случай, когда скорость пластической деформации входит в уравнение поверхности нагружения и само это уравнение (наряду с условием градиентальности) используется для определения приращения пластической деформации. Последний случай следует рассматривать как специфическую форму записи соотношений теории вязкопластичности.

О НЕКОТОРЫХ ВАРИАНТАХ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ГОРЯЧЕЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ИХ СТРУКТУРЫ

Р.А. Васин

НИИ механики МГУ, Москва

Приводятся типичные экспериментальные данные о характерных особенностях поведения сплавов при горячем деформировании. Для описания такого поведения сплавов обычно используются определяющие соотношения с внутренними переменными, так или иначе отражающими эволюцию микроструктуры сплава в процессе его деформирования. Сопоставляются два основных подхода к построению таких определяющих соотношений – с использованием модели Джонсона – Мейла – Аврами – Колмогорова (JMAK), описывающей кинетику рекристаллизации в сплаве, и более традиционного для механики деформируемого твердого тела, основанного на применении феноменологических определяющих соотношений, предложенных Ю.Н. Работновым и апробированных при описании разнообразных процессов ползучести. Отмечается недостаточное исследование применимости моделей типа JMAK к описанию высокотемпературных процессов сложного нагружения сплавов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-04281).

ПОДХОД К ИДЕНТИФИКАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ В ШАРНИРЕ УПРАВЛЯЕМОГО ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА ПО АМПЛИТУДАМ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ

О.Э. Васюкова [1], *В.А. Самсонов* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается динамическая модель управляемого физического маятника. При помощи метода Понтрягина показано, что установившиеся колебания рассматриваемой системы можно реализовать на основе управления, зависящего от знака угловой скорости. Проведено численное моделирование движения системы, иллюстрирующее диапазон малого параметра системы, для которого можно применять предложенный в работе метод. Проанализированы отличия применения предложенного метода для разных моделей трения. В частности, для модели, в которой трение зависит от нормальной реакции в шарнире, возможна реализация нескольких типов колебательных движений, часть из которых неустойчива. Построены соответствующие бифуркационные диаграммы. Предложена стратегия идентификации коэффициентов момента трения в шарнире манипулятора, основанная на наблюдении установившихся колебаний и использовании метода наименьших квадратов.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА О ВОССТАНОВЛЕНИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ НАГРУЗКИ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА БАЛКУ ТИМОШЕНКО

Я.А. Вахтерова [1], *Г.В. Федотенков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В прямоугольной декартовой системе координат рассматривается однородная изотропная балка конечной длины, исследование поперечных колебаний которой производится на основе уточненной теории, соответствующей модели балки типа Тимошенко. В качестве граничных условий используются условия шарнирного опирания. Начальные условия нулевые. В начальный момент времени к балке прикладывается распределенная нагрузка, зависящая от координаты и времени. Закон распределения нагрузки по пространственной координате предполагается заданным.

Решение прямой задачи основано на использовании нестационарных функций влияния. Они представляет собой нормальные перемещения и углы поворота сечений балки за счет сдвиговых деформаций от действия внешней нагрузки, распределенной известным образом по пространственной координате. Зависимость нагрузки от времени описывается с помощью дельта-функции Дирака. Решения этой вспомогательной задачи (функции влияния) разыскиваются в виде разложений в ряды Фурье по тригонометрическим системам собственных функций. К полученной системе обыкновенных дифференциальных уравнений применяется интегральное преобразование Лапласа по времени с последующим обращением. В результате решение прямой задачи выражается в интегралах типа свертки функций влияния с приложенной нагрузкой.

Обратная задача по идентификации временного закона изменения нагрузки ставится следующим образом. В некоторой точке балки, с заданной координатой, установлен датчик, который измеряет значения прогиба балки в зависимости от времени.

Требуется по данным, полученным с датчика, идентифицировать временной закон изменения внешней нагрузки. В этом случае решение обратной задачи сводится к решению интегрального уравнения Вольтера I рода.

Эта задача нарушает требования корректности по Адамару. Проблема решается путем дифференциации левой и правой части по времени, что приводит к выполнению условий корректности.

Получены решения ряда тестовых задач по идентификации закона изменения внешней нагрузки по времени. Данный метод показал удовлетворительный результат. Исследованы возможности применения предложенного метода идентификации при наличии зашумленности измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-58-00034_Бел_а).

ВАРИАНТ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В ПАКЕТЕ ФИДЕСИС

И.И. Вдовиченко [1], *К.М. Зингерман* [2], *В.Ан. Левин* [1], *М.Я. Яковлев* [3]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;
[2]ТвГУ, Тверь;
[3] ООО «ФИДЕСИС», Москва

Одним из вариантов оценки эффективных характеристик композиционных материалов является численный расчет на представительном объеме композита нерегулярной структуры либо на ячейке периодичности композита регулярной, периодической структуры. На представительном объеме (ячейке периодичности) численным путем решается ряд краевых задач с различными граничными условиями. Результаты решения задач осредняются по объему. После этого оценивается зависимость между приложенными к модели граничными условиями и полученными осредненными результатами, на основе которой и определяются эффективные характеристики композиционного материала.

Описанный вариант оценки эффективных свойств реализован в CAE Fidesys применительно к упругим свойствам, теплопроводности и температурному расширению композиционных материалов – для двумерного и для трехмерного случая. Поддерживается возможность оценки эффективных характеристик как композитов нерегулярной геометрической структуры (в этом случае расчет проводится на представительном объеме, к которому прикладываются непериодические граничные условия), так и композитов периодической структуры (расчет производится на ячейке периодичности, к которой прикладываются периодические граничные условия). В качестве композита непериодической структуры может рассматриваться образец горной породы (керн). Краевые задачи теории упругости и теплопроводности решаются методом конечных элементов либо более современным методом спектральных элементов. Расчеты распараллелены с помощью технологий OpenMP (для систем с общей памятью) и MPI (для систем с распределенной памятью). Полученные в результате расчета эффективные константы материалов автоматически интерпретируются как ортотропные либо изотропные, в зависимости от типа полученного эффективного материала.

Исследования для данной работы были проведены в ООО «Фидесис» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской федерации (проект № 14.579.21.0112, ID проекта RFMEFI57915X0112).

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРУЖЕННОГО НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

А.В. Вершинин [1] *, В.Ан. Левин* [1]*, И.С. Лукьянчиков* [1]*, А.М. Сбойчаков* [2]*, М.Я. Яковлев* [2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;
[2] ООО «ФИДЕСИС», Москва

В докладе описывается подход к численной оценке эффективных механических характеристик предварительно нагруженного неоднородного материала (композиционного либо пористого). В качестве предварительных нагрузок рассматриваются внутреннее поровое давление, нагрев, массовая сила и т.д., которые могут вызвать в материале конечные деформации. Свойства материалов задаются с помощью модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Эффективные свойства оцениваются с помощью численного конечноэлементного расчета на представительном объеме/площади неоднородного материала (либо ячейке периодичности). Расчет осуществляется с помощью CAE Fidesys.

Сначала вычисляются и осредняются напряжения в представительном объеме/площади (ячейке периодичности), вызванные предварительным нагружением. При этом учитывается геометрическая нелинейность. Далее представительный объем/площадь предварительно нагруженного материала подвергается ряду деформаций. Возникшие при этом напряжения также осредняются, после чего из них вычитаются средние напряжения, вызванные предварительным нагружением. На основе полученных результатов с учетом величины и типа прикладываемых деформаций оцениваются эффективные упругие характеристики предварительно нагруженного материала.

Исследования для данной работы были проведены в ООО «Фидесис» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской федерации (проект № 14.579.21.0112, ID проекта RFMEFI57915X0112).

О СВЯЗАННЫХ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ СЛАНЦЕВЫХ ФОРМАЦИЙ

А.В. Вершинин [1]*, В.Ан. Левин* [1]*, А.В. Мясников* [2]*, Д.И. Сабитов*[2]*, А.М. Сбойчаков* [3]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2] Сколковский институт науки и технологий, Москва;
[3]ООО «Фидесис», Москва

При описании процессов фильтрации жидкости через пористую трещиноватую среду необходимо учитывать взаимное влияние процессов, протекающих в жидкости и деформируемом скелете горной породы, через который осуществляется фильтрация: изменение порового давления жидкости, изменение геомеханических напряжений и деформаций в процессе фильтрации, изменение пористости и проницаемости скелета и др.

Авторами проведена работа по выявлению и анализу особенностей построения гидрогеомеханических моделей, способных служить адекватной основой технологий разведки и разработки баженовской свиты Фроловской мегавпадины Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Построение таких моделей в настоящее время вызывает серьезные затруднения, что связано в первую очередь с недостатком исходных данных

о строении и свойствах пород залежи. В результате сравнительного анализа геологических, литологических, геохимических, петрофизических и промысловых данных, накопленных при изучении нетрадиционных нефтенасыщенных горных пород, удалось выявить некоторые физико-механические особенности, присущие в той или иной степени всем сланцевым формациям и определяющие особенности их гидро-геомеханического моделирования по сравнению с традиционными коллекторами.

Для численного решения связанной гидрогеомеханической задачи в рамках указанной модели можно использовать хорошо зарекомендовавший себя метод расщепления по физическим процессам. При использовании данного метода на каждом шаге интегрирования по времени независимо отыскиваются решения геомеханической и гидродинамической задач, после чего происходит обмен данными между решателями, и решения повторяются до достижения сходимости. Несмотря на относительно невысокую скорость сходимости и достаточно жесткие ограничения, накладываемые на шаг по времени, данный метод обладает неоспоримым преимуществом – возможностью использования готовых решателей для моделирования отдельных физических процессов в рамках связанной задачи при обеспечении соответствующей интеграции между ними. В случае рассматриваемой задачи фильтрации жидкости сквозь деформируемую пористую породу, пронизанную системами трещин, для моделирования геомеханических процессов, протекающих в горных породах, использовались решатели в составе пакета CAE Fidesys.

Исследования для данной работы были проведены в ООО «Фидесис» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской федерации (проект №14.579.21.0112, ID проекта RFMEFI57915X0112).

ВАРИАНТ ОБОБЩЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

А.В. Вершинин [1], *В.Ан. Левин* [1], *А.В. Мясников* [2], *А.М. Сбойчаков* [3]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2] Сколковский институт науки и технологий, Москва;
[3]ООО «Фидесис», Москва

В данной работе рассматривается обобщение модели Багери – Сеттари для расчета эффективных свойств элемента горной породы (ячейки периодичности) из упругого материала, рассеченного группами плоскопараллельных трещин. В первоначальном варианте полуаналитической модели каждая из трещин заменяется упругими связями с различающимися жесткостями в нормальном и тангенциальном направлениях. При этом в определяющем соотношении трещины, задаваемом связями между компонентами вектора перемещений и вектора усилий (напряжения на площадке, параллельной трещине) в нормальном и тангенциальном направлениях, пренебрегаются эффекты дилатансии и сдвиговых деформаций в результате действия нормальных напряжений. Далее, в соответствии с концепцией эквивалентной среды для связанных горных пород, эффективные модули податливости трещин рассчитываются на основе расстояния между трещинами и жесткостями упругих связей. Для расчета полного эффективного тензора упругости трещиноватой среды вводится допущение малости деформаций, в соответствии с которым полные деформации равны сумме деформаций скелета и трещин.

В данной статье, за счет построения трехмерной численной модели ячейки периодичности, удалось снять оба ограничения исходной аналитической модели: диагональная связь между смещениями и усилиями в трещине и малые деформации. Данное обобщение стало возможным путем моделирования трещины тонким слоем из

упругого материала с соответствующими исходным нормальным и тангенциальным жесткостям модулем Юнга и модулем сдвига (исходный вариант получается обнулением коэффициента Пуассона) и учетом геометрической нелинейности в связи между деформациями трещины и смещениями ее берегов.

На основе обобщенной численной модели строится конечноэлементная модель в CAE Fidesys, позволяющая варьировать параметры системы трещин: количество, шаг, толщина, жесткости и т.д. Приводятся результаты осреднения для ячейки периодичности, рассеченной тремя группами плоскопараллельных трещин – первые две группы трещин ортогональны третьей группе и пересекаются под заданным углом. Обсуждаются результаты численных исследований на сеточную сходимость, влияние размеров ячейки периодичности и толщины трещины на результаты осреднения. Демонстрируется близость аналитического и численного решений для упрощенной модели и разница между ними в случае обобщенной модели, приводящей, в ряде случаев, к изменению эффективного модуля Юнга до 30 %.

Исследования для данной работы были проведены в ООО «Фидесис» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской федерации (проект № 14.579.21.0112, ID проекта RFMEFI57915X0112).

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ И ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В ПАКЕТЕ «ФИДЕСИС»

А.В. Вершинин [1], *В.Ан. Левин* [1], *К.А. Петровский* [2]

[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;
[2]ООО «Фидесис», Москва

В докладе излагается алгоритм решения задач механики деформируемого твердого тела с оболочечными элементами при конечных деформациях. Для учета изменения толщины элемента при деформировании конструкции используется 7-мипараметрическая оболочечная модель. Нелинейная постановка задачи учитывает как конечные деформации, так и конечные повороты. Обсуждаются особенности программной реализации оболочечного элемента на основе метода спектральных элементов для пакета прочностного анализа «Фидесис». Приводятся результаты решения статических и динамических задач с использованием метода спектральных элементов. Обсуждаются преимущества использования спектрального оболочечного элемента.

ЗАКОНЫ СТЕНКИ ДЛЯ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

И.И. Вигдорович

НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается сверхзвуковой турбулентный пограничный слой на пластине при нулевом продольном градиенте давления. Разработана рациональная асимптотическая теория, главными элементами которой являются (а) условия замыкания, связывающие турбулентное касательное напряжение и турбулентный поток тепла с градиентами усредненной скорости и энтальпии, (б) специальная замена переменных в уравнениях

пограничного слоя, которая позволяет искать решение задачи в виде асимптотических разложений при больших значениях логарифма числа Рейнольдса, образованного по толщине пограничного слоя, (в) решение уравнений Рейнольдса для сжимаемого газа в трех характерных областях течения (вязкий подслой, логарифмический подслой, внешняя область пограничного слоя) с последующим асимптотическим сращиванием. Теория не предполагает использования каких-либо частных гипотез о характере турбулентного обмена и фактически основывается только на первых принципах.

Получено обобщение законов стенки для скорости и температуры для течения сжимаемого газа. Оказывается, что известная формула Ван-Дриста дает только главный член асимптотического разложения для профиля скорости в логарифмическом подслое. Точное асимптотическое решение содержит дополнительные слагаемые порядка единицы, которые позволяют получить лучшее согласование с экспериментом, особенно при наличии теплопередачи на стенке.

Кроме постоянной Кармана и турбулентного числа Прандтля в логарифмической области, известных для течения несжимаемой жидкости, в теории появляются три новые универсальные постоянные, которые определены путем обработки экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00172).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

Ю.А. Виноградов, С.С. Попович, М.М. Стронгин

НИИ механики МГУ, Москва

Сжимаемость газа необходимо учитывать в расчетах процессов теплообмена между газом и обтекаемой стенкой при течении потока со скоростью выше около 0,4 М. За счет торможения высокоскоростного потока возле стенки энергия потока преобразуется в большее количество теплоты, чем при течении с малыми дозвуковыми скоростями. Интенсивность теплообмена оценивают по коэффициенту теплоотдачи α, который, с учетом эффектов сжимаемости, определяется отношением теплового потока в стенку q_w к разности между температурой стенки T_w и адиабатной температурой T_{aw}:

$$q_w = \alpha\left(T_{aw} - T_w\right).$$

При определении коэффициента теплоотдачи по соотношению (1) основной проблемой является нахождение адиабатной температуры стенки T_{aw}. В практике инженерных и научных расчетов эта температура определяется через коэффициент восстановления температуры r, полную температуру в потоке T_0^* и число Маха M:

$$T_{aw} = T_\infty\left(1 + r\frac{\gamma - 1}{2}\mathrm{M}^2\right).$$

Чувствительность коэффициента теплоотдачи к изменению коэффициента восстановления температуры дополнительно усиливается невысокими значениями температуры потока при проведении исследований на большинстве аэродинамических труб, поскольку разность температур $(T_{aw} - T_w)$ в этом случае, как правило, мала. Поэтому параметры теплообмена в сверхзвуковых аэродинамических трубах могут значительно

изменяться, если небольшие неточности появляются при расчете коэффициента восстановления.

Предлагается методика одновременного определения коэффициентов теплоотдачи и восстановления температуры в процессе запуска сверхзвуковой аэродинамической установки до выхода на равновесный тепловой режим. Методика заключалась в регистрации изменения параметров на стенке модели от момента запуска аэродинамической трубы с частотой 1 Гц. Темп охлаждения пластины отслеживался с помощью запрессованных на поверхности модели термопар. Полученные данные после обработки позволили восстановить тепловой поток на стенке.

В процессе проведения эксперимента достижение температуры стенки значения адиабатной температуры было практически затруднено. Помимо необходимости проведения длительного эксперимента, задача усложняется еще и уменьшением температуры торможения потока в трубе со временем. Поэтому значение адиабатной температуры стенки определялось с помощью экстраполирования линейной части графика функции обезразмеренного теплового потока до нулевого значения – оси абсцисс. При этом угол наклона экстраполированного графика позволяет определить коэффициент теплоотдачи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-19-00699).

ВЛИЯНИЕ СМАЧИВАНИЯ НА ФОРМУ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ СООСНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЯМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЛИНЕЙНОГО ПРОВОДНИКА ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

А.С. Виноградова [1], *В.А. Налетова* [1,2], *В.А. Турков* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

В магнитном поле линейного проводника с током магнитная жидкость между двумя соосными цилиндрами меняет свою форму поверхности при квазистатическом изменении тока в проводнике. При некоторых значениях тока в проводнике и объема магнитной жидкости форма поверхности может меняться скачкообразно и может наблюдаться гистерезис формы, т.е. формы магнитной жидкости при увеличении тока в проводнике не совпадают с формами при уменьшении тока. В условиях гидроневесомости такая магнитожидкостная перемычка между цилиндрами может занимать любое положение вдоль проводника и не может выдерживать никакого перепада давления.

Чтобы зафиксировать положение магнитной жидкости, в данной работе в случае гидроневесомости рассматривается задача о тяжелой, несжимаемой, однородной, изотермической магнитной жидкости конечного объема между соосными коническими и цилиндрической поверхностями, на оси которых находится линейный проводник с током. Наличие ограничивающих конических поверхностей позволяет такой магнитожидкостной перемычке выдерживать перепад давления. С учетом закона Ланжевена получено общее аналитическое решение, описывающее форму поверхности магнитной жидкости в поле линейного проводника в случае гидроневесомости. Исследовано влияние характера смачивания магнитной жидкостью ограничивающих твердых поверхностей на форму поверхности магнитной жидкости.

В случаях смачивания и несмачивания предложена методика исследования разрушения и восстановления магнитожидкостной перемычки между соосными коническими и цилиндрической поверхностями в магнитном поле линейного проводника

при наличии перепада давления. Показано, что перепад давления в случае несмачивания может приводить к неоднозначности формы магнитной жидкости, связанным с ней скачкообразным изменениям и гистерезису формы, чего не обнаружено в случае смачивания. Также показано, что перемычка заданного объема может распасться предсказуемым образом при токе распада и непредсказуемым образом при критическом токе. В зависимости от значений объема магнитной жидкости и тока распада перемычка может как восстановиться, так и не восстановиться. Обнаружено, что в случае смачивания существует пороговое значение тока, начиная с которого перемычка может выдерживать ненулевой перепад давления. В случае несмачивания перемычка может выдерживать перепад давления даже при нулевом токе. В случае смачивания при значениях параметров задачи, аналогичных случаю несмачивания, перемычка выдерживает намного меньший перепад давления, чем в случае несмачивания.

Таким образом, разработанные методики изучения деформации поверхности магнитной жидкости в магнитном поле линейного проводника с током могут найти практическое применение при расчете характеристик и конструировании прототипов насосов, клапанов, прерывателей, дозаторов и других устройств с управляемым положением магнитной жидкости, в которых периодически меняется магнитное поле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-51-12024).

О ДВИЖЕНИИ ШАЙБЫ НА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛОСКОСТИ

О.А. Виноградова, А.В. Карапетян

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается задача о движении однородного кругового цилиндра (шайбы) по вращающейся плоскости с трением. Предполагается, что в каждой точке основания шайбы имеет место локальный закон сухого трения Кулона. Результирующая сила и момент трения вычисляются в рамках динамически совместной модели трения, предложенной А.П. Ивановым. Найдены инвариантные множества задачи и исследованы их свойства. В случае достаточно малого коэффициента трения Кулона построено общее решение уравнений движения шайбы в виде ряда по степеням этого коэффициента. По результатам численного интегрирования сделаны некоторые качественные выводы о движении диска (шайбы нулевой высоты).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00338).

ДОЗВУКОВОЕ ОТРЫВНОЕ ОБТЕКАНИЕ УДЛИНЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ РАЗЛИЧНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ, ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

И.С. Водопьянов, И.И. Даржания, А.А. Синявин

НИИ механики МГУ, Москва;

Вопросы аэродинамики простейших форм по-прежнему остаются актуальными при решении фундаментальных и прикладных задач аэрогидродинамики. Исследование процессов взаимодействия потоков и струй с простейшими телами позволяет вырабатывать базис, который востребован в различных областях техники, а также является эталоном при тестировании различных программных комплексов, призванных решать

задачи аэрогидродинамики различных тел. Одним из наиболее часто востребованных классов тел являются цилиндрические профили различного удлинения и различной формы поперечного сечения. Исследование аэродинамики таких цилиндров имеет обширную историю, во множестве публикаций отмечаются различные эффекты, вызванные нестационарными процессами обтекания.

В настоящей работе исследуется вопрос о распределении локальных нестационарных аэродинамических характеристиках на поверхности цилиндров большого удлинения, с поперечным сечением в виде полукруга, треугольника и квадрата. В дозвуковой аэродинамической трубе А-10 НИИ механики МГУ выполнена серия экспериментальных исследований по измерению нестационарных пульсаций давления на поверхности цилиндров с поперечным сечением в форме полукруга, треугольника и квадрата, даны оценки интегральных аэродинамических характеристик. Для указанных форм детально исследовано влияние угла атаки в диапазоне чисел Рейнольдса $(6\text{-}9)\cdot 10^4$ при варьировании интенсивности турбулентности в диапазоне 0,2-4,0 %.

С помощью экспериментальной методики управления обтеканием с помощью продольных отсечных шайб, устанавливаемых на цилиндрах по обе стороны от измерительного сечения с приемниками статического давления, выявлены эффекты двумеризации отрывного обтекания профиля, выражающиеся в сближении значений коэффициента давления максимального ветрового отсоса и характерных чисел Струхаля с известными теоретическими результатами численного моделирования обтекания профилей в рамках двумерных гидродинамических моделей.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ (тема 5.3 «Математическое и физическое моделирование нестационарных взаимодействий неограниченных газовых потоков и струй со сплошными и проницаемыми телами», № гос. рег. АААА-А16-116021110201-2).

МНОГОМЕРНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ МВЗ-ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ НА МНОЖЕСТВЕ БИРЖЕВЫХ ТОВАРОВ

В.В. Водянова [1], *М.П. Заплетин* [2,3], *М.А. Минченков* [3]

[1]Государственный университет управления, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[3]Национальный институт развития Отделения общественных наук РАН, Москва

Товары с дуальными свойствами – товары, обладающие одновременно товарными свойствами, валютными свойствами и ликвидностью. В силу этих качеств, порожденных вещественными характеристиками, дуальные товары помимо своего прямого назначения – сырьевого использования для производства промышленной продукции – могут использоваться как некий страховой продукт с устойчивой ценой, обоснованной потребностью в них. Мы предлагаем создать синтетический товар – индекс мультивалютного значения устойчивости (МВЗ-индекс). Наполнение МВЗ-индекса осуществляется по принципу: товар остается в индексе при условии, что отклонения его цены от цены базового товара не превышают консенсусно определенных границ. Синтетический товар может выполнять роль монетарного золота, значительно расширяя золотовалютную базу, используемую в расчетах при выпуске денежных агрегатов. Его расчет осуществляется на базе поперечника Колмогорова n-го порядка, в котором одной из составляющих является «золотой индекс» – поперечник Колмогорова, построенный на базе ценового ряда монетарного золота. Оставшимися $(n-1)$ составляющими могут выступать индексы, в основе которых лежат ценовые ряды

консенсусно выбранных товаров или резервных валют. Таким образом, мы осуществляем многомерную аппроксимацию МВЗ-индекса устойчивости, построенного на множестве дуальных товаров.

Кроме того, такой подход позволяет уточнить формулу обмена Фишера, связывающую количество денег, находящихся в обращении (агрегат M_0), и общую сумму товарных цен и показать, что увеличение денежной массы можно осуществлять и без увеличения инфляции, например за счет увеличения скорости обращения денег, путем выпуска неэмиссионных ценных бумаг.

Денежную массу, находящуюся в обращении, следует разделить на три подгруппы: количество денег, находящихся в потреблении ($M_{потр}$) – собственно агрегат M_0; количество денег, выпущенных в обращение, но не дошедших до получателя по различным причинам (M_V); количество денег, эквивалентное стоимости товаров с дуальными свойствами (M_Q).

Например, денежные средства Казначейства к концу года должны составлять нулевой остаток согласно Бюджетному кодексу. На самом деле они образуют ненулевой переходящий остаток, величина которого измеряется триллионами рублей. Эти средства, по классификации авторов доклада, должны быть отнесены к агрегату M_V.

Агрегат M_Q формируется за счет цен на товары с дуальными свойствами, которые в силу своей природы могут выполнять функцию денег, а его величина, по предложению авторов доклада, рассчитывается по алгоритму построения МВЗ-индекса устойчивости.

Монетизация этих агрегатов возможна за счет секьютиризации путем выпуска неэмиссионных ценных бумаг. Кроме того, агрегаты M_V и M_Q порождают дополнительные доходы (налоги, акцизы и пр.), а также объемы произведенных товаров. На основании формулы обмена в случае отсутствия существенных изменений цен на товары можно говорить о безынфляционном увеличении денежной массы, находящейся в обращении, и о таргетировании инфляции на заданном уровне с последующим вычислением допустимой величины всех рассмотренных выше агрегатов.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕМ-ГРАММ-МОДЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА СОЦИУМА

А.В. Галатенко [1], *А.А. Артемов* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва,
[2]НИЦ «СТРАТКОМ», Мытищи, Моск. обл.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследовании с использованием математического моделирования, направленных на анализ эффективности применения аппарата (разработанной авторами) мем-грамм-модели, для описания процесса (эволюционного и революционного) изменения содержания информационного пространства социально-телекоммуникационной системы (ИП СТС). В качестве информационной базы для исследования были приняты статьи, опубликованные в русскоязычном сегменте ИП СТС с июня по август 2014 г. Для составления словаря использовались наиболее популярные по версии сервиса mediametics.ru статьи, которые заинтересовали пользователей социальных сетей. Исходные данные содержали ссылку на статью, дату публикации, количество просмотров и название страны – источника публикации. Подготовка исходного массива n-грамм, выявление и расчет характеристик

мемов производились с применением разработанного автором прикладного программного обеспечения.

В ходе исследования были проверены две гипотезы, представляющие интерес при использовании мем-грамм-модели на практике: 1) чем выше сила информационного воздействия на ИП СТС относительно мемов (объектов ИП СТС), содержащихся в сообщении, тем актуальнее для социума данное сообщение; 2) существуют типовые минимальные интервалы времени, в которых происходят максимальные изменения ИП СТС (эффективные интервалы). Первая гипотеза частично подтверждается. Анализ зависимостей изменения во времени сил информационного воздействия на мемы позволяет с высокой надежностью определять ключевые события и их дату их появления в исследуемом информационном пространстве. В то же время, связь между значением суммы сил мемов в сообщении и числом просмотров сообщения имеет нелинейный (сложный) характер. Поэтому, необходимо выявление дополнительных факторов, влияющих на число просмотров (охват) сообщения в зависимости от силы мемов сообщения. Вторая гипотеза подтверждается полностью. Агрессивность мема в пределах от 1 до 10 единиц является ключевым признаком, позволяющим отличить мем от устойчивого выражения (так называемой культурной языковой константы). Применение усредненного (по всем мемам) преобразования Фурье позволило выявить 2 эффективных дискретных интервала: наиболее агрессивные мемы (с агрессивностью 1-10 единиц) заполняют информационное пространство социума с периодичностью 4,31 и 6,21 сут.

В результате исследования подтверждена возможность применения мем-грамм-модели для выявления факта появления нового содержания (мутации), количественной оценки (силы) информационного воздействия и установления сопровождающих такое воздействия закономерностей в процессе изменения состава элементов наследственности содержания (цифрового) информационного пространства социума.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ СКРЫТЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Галатенко, И.Б. Казаков

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Под скрытыми каналами понимается передача информации с помощью методов, изначально не предназначенных для передачи. Широкий класс сетевых скрытых каналов основан на передаче информации через порядок сетевых пакетов. Скажем, если у некоторого сервера имеется N ip-адресов, чередование адресов запросов позволит закодировать достаточно большой объем данных. В докладе рассматривается класс каналов, в которых кодирование осуществляется перестановками из множества SN, мощность которого равна N. Однако, в процессе прохождения по сети, порядок пакетов может измениться. Изучается несколько типов модификации: транспозиции пакетов, вставки пакетов, удаление пакетов. Основная задача заключается в построении кодов, исправляющих k ошибок заданного типа.

Первая часть доклада посвящена рассмотрению кодов в случае, когда значение N сравнительно невелико (порядка 10). Множество перестановок отображается в граф, вершинами которого являются перестановки, а ребра соединяют пары вершин, которые могут перейти друг в друга в результате ошибок при передаче. Построение кода сводится к задаче о максимальном независимом множестве вершин или, что эквивалентно, к задаче о клике на графе-дополнении. Приводятся либо точные значения мощности максимального кода, либо результаты процедуры нахождения приближенного оптимума.

Отметим, что точное решение даже при небольших значениях N получить тяжело в силу довольно значительного размера возникающего графа и трудности задачи о клике.

Вторая часть доклада посвящена построению теоретических верхних и нижних оценок мощности кода. Изучаются различные свойства возникающего графа, доказываются утверждения, характеризующие, в том числе, любопытные свойства симметрической группы.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В СЛОЕ

Д.В. Георгиевский

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается развитие со временем возмущений, налагаемых на заданное нестационарное сдвиговое течение идеально жесткопластического тела (или течения Сен-Венана) в плоском слое. На основе анализа квадратичных функционалов и соответствующих вариационных неравенств выводится оценка роста либо затухания возмущений по интегральной мере. В оценивающую функцию входит зависящая от времени верхняя грань скорости деформации основного сдвига. Введение предела текучести в модель идеальной жидкости стабилизирует течение, однако в длинноволновом пределе данная стабилизация становится сколь угодно малой.

О ВЛИЯНИИ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОВКЛАДА НА СВЕРХЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ МАХА НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин

НИИ механики МГУ, Москва

В работе численно исследовано сверхзвуковое обтекание затупленных тел при наличии энерговклада, локализованного в малой области набегающего потока. В расчетах использовались уравнения Эйлера в нестационарной осесимметричной постановке и модель энергоисточника (удельная мощность энерговклада в расчете на единицу массы задавалась как функция координат и времени). Изучено влияние числа Маха потока, размеров области энерговклада и подводимой мощности на параметры передних отрывных зон, формирующихся при взаимодействии с высокотемпературным следом за областью энерговклада – «тепловой иглой».

Определены условия, обеспечивающие эффективное снижение волнового сопротивления затупленных тел. Показано, что интенсивность энерговклада должна быть прямо пропорциональна числу Маха набегающего потока и обратно пропорциональна линейному размеру энергоисточника. В этом случае ключевой параметр – коэффициент мощности энерговклада (отношение подведенной мощности к потоку внутренней энергии через поперечное сечение энергоисточника) остается примерно постоянным. Первое условие означает, что жидкая частица за время движения через область энерговклада получает при разных скоростях набегающего потока примерно одинаковое количество тепла. Второе условие является точным условием подобия для задачи об обтекании

энергоисточника сверхзвуковым потоком, которое обеспечивает сохранение параметров высокотемпературного следа при изменении размеров энергоисточника.

Выполнена серия численных расчетов нестационарного обтекания затупленного тела – сферы при наличии в набегающем потоке энергоисточников, для которых выполнены оба описанных выше условия. При динамическом уменьшении размеров энергоисточника и фиксированном числе Маха набегающего потока форма передней отрывной зоны изменяется, приближаясь к форме конуса с малым затуплением, но при этом статическое давление в отрывной зоне не изменяется и снижение сопротивления остается постоянным. Установлено, что для различных чисел Маха и энергоисточников одинакового размера формируются передние отрывные зоны практически одинаковой геометрии и снижение сопротивления также остается примерно одинаковым. Получена и проверена в численных расчетах простая формула для коэффициента эффективности снижения сопротивления (определяется как отношение сэкономленной мощности к вложенной). Показано, что коэффициент эффективности пропорционален числу Маха в квадрате и обратно пропорционален линейному размеру области энерговклада также в квадрате. В расчетах зафиксировано снижение волнового сопротивления 30 %, а коэффициент эффективности при числе Маха 5 превысил 1 000 (для сферического энергоисточника, радиус которого в 50 раз меньше радиуса сферы).

Таким образом, концепция «тепловой иглы» является перспективной для улучшения аэродинамических характеристик тел (особенно затупленных) ввиду чрезвычайно высокой эффективности снижения волнового сопротивления для очень малых областей энерговклада и высоких чисел Маха набегающего потока.

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ, при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092-офи_м).

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ ПРИ ДИФРАКЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА КЛИНЕ

П.Ю. Георгиевский [1], *А.Н. Максимов* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Проблема дифракции ударной волны на клине, впервые описанная еще в XIX в. Махом, по сей день является не до конца разрешенной, несмотря на многочисленные экспериментальные, численные и теоретические исследования, проводимые в этой области. Например, до сих пор до конца не изучены механизм перехода между различными маховскими конфигурациями и поведение ударных волн в газе с близкими к единице показателями адиабаты при больших числах Маха.

В настоящей работе численно исследованы различные типы маховского отражения при дифракции ударной волны на клине, проведено сравнение с известными тестами и современными экспериментальными данными, изучены различные типы отражений при изменении угла раствора клина, числа Маха набегающего потока и показателя адиабаты газа, обнаружен новый тип многократного маховского отражения, который характеризуется ветвлением ударно-волновых конфигураций.

Численные расчеты выполнены с использованием TVD-модификации явной схемы МакКормака, предложенной Дэвисом в 1984 г., отличительной особенностью которой является сохранение монотонности. Как показало сравнительное тестирование на различных одномерных и двумерных задачах газовой динамики, данная схема

на подробных сетках при соответствующем выборе ограничений на шаг по времени обеспечивает сравнимые по качеству результаты с более современными методами, такими как WENO. В частности, схема успешно справилась с известным тестом Такаямы 1997 г. для задачи о дифракции ударной волны на клине.

Выполнено сравнение с экспериментальными данными И.В. Красовской 2012 г. для различных случаев дифракции ударной волны на клине (различных чисел Маха, углов раствора клина и газов различного состава – углекислого газа и фреона-12). Численные расчеты проводились на сетке 6400×1600 узлов. С помощью средств визуализации «numerical schlieren» для каждого случая была построена картина течения, что позволило напрямую сравнить численные результаты с экспериментальными. Исследованы маховские конфигурации: отражение фон Неймана, ординарное отражение Маха – Смита, ординарное отражение Маха – Кабанна, ординарное отражение Маха-Уайта, двойное отражение Маха – Кабанна, двойное отражение Маха – Уайта, предельное двойное маховское отражение, тройное отражение Маха – Уайта. Получено хорошее совпадение по всем типам маховских конфигураций, кроме случая предельного двойного маховского отражения, реализуемость которого вызывает сомнения и у И.В. Красовской.

При последующем целенаправленном поисковом исследовании дифракции ударной волны на клине в диапазоне, когда происходит переход от регулярного отражения к двойному маховскому, был обнаружен качественно новый тип многократного маховского отражения, который характеризуется ветвлением ударно-волновых конфигураций. На подробной картине течения, рассчитанной на сетке 12800×3200 узлов, удалось насчитать пять тройных маховских конфигураций.

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ, при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092-офи_м).

ДВИЖЕНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ЭКИПАЖА С МАССИВНЫМИ РОЛИКАМИ НА ОМНИ-КОЛЕСАХ

К.В. Герасимов [1], *А.А. Зобова* [1], *И.И. Косенко* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИУ МАИ, Москва

Рассматривается динамика движения по инерции симметричного экипажа, снабженного омни-колесами, по горизонтальной неподвижной плоскости. Омни-колеса представляют собой диски, по ободу которых укреплены ролики, вращающиеся без трения относительно касательной к ободу. Таким образом, омни-колесо может двигаться не только как обычное колесо, перекатываясь с ролика на ролик, но и перемещаться в направлении, перпендикулярном к плоскости колеса. Снабжение мобильных платформ такими колесами повышает их маневренность. Ранее динамика омни-экипажей изучалась для простейшей модели омни-колеса: твердого диска, скорость наинизшей точки которого перпендикулярна плоскости колеса. Масса роликов в этой модели не учитывается. В настоящей работе исследуется динамика системы, в которой ролики массивны, причем в точках контакта роликов и плоскости отсутствует проскальзывание. В предположении идеальности неголономных связей, с помощью системы символьных вычислений Maxima составлены уравнения движения в форме лаконичных уравнений Я.В. Татаринова. Обсуждается моделирование процесса перехода с одного опорного ролика на другой ролик. Полученные динамические уравнения интегрируются численно, полученные

траектории сравниваются с траекториями динамической системы, полученной для простейшей модели омни-колеса.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-01-00338).

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ И МНОГОКАНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА С ПОМОЩЬЮ РАЗРЯДНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКИМ ТЕПЛОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ

А.П. Глинов, А.П. Головин, П.В. Козлов

НИИ механики МГУ, Москва

Приводятся результаты экспериментальных исследований дуговых разрядов и сформированных с их помощью движущихся плазменных сгустков. Подобные сгустки могут образовываться, например, как в рельсовых системах, так и компактном коаксиальном плазмотроне с элементами капиллярного разряда. Одной из областей приложения таких плазменных струй может быть электроразрядное инициирование детонации, например, посредством инжекции плазменных струй в детонационный объем. Полученная в экспериментах на модельном компактном инжекторе плазменная струя дозвуковая. Эксперименты проведены в воздушной среде атмосферного давления. Создаваемая на опытном образце импульсного инжектора плазма имеет следующие параметры: диаметр выходного сопла – 8 мм; толщина анодной стенки канала – до 4 мм; диаметр струи – до 10 мм; температура – 5-12 кК; скорость потока плазмы, оцененная по скорости частиц-маркеров, – порядка 200 м/с; отношение длины плазменной струи к ее диаметру – более 17; КПД генератора плазмы ≈ 30%; вложенная в струю мощность W ≈ 20-24 кВт (50-60 В, 400 А). Для экспериментального моделирования движущихся плазменных сгустков применена схема рельсотрона. Инициирование дуги осуществлялось взрывом проволочек. Для стабилизации движения дуговой плазмы (не ограниченной боковыми стенками) по рельсам накладывалось внешнее магнитное поле. Оно создавалось протекающими по шинам токами, параллельными току дуги. Токи шин рельсотрона и витков подмагничивания (до 350 А) питались от независимых источников. В конструкциях применялись медные и графитовые электроды. Высота канала ускорителя дуг от зоны инициирования до зоны их вылета изменялась линейно от 4 до 7 мм. Проводилась регистрация сигналов токов и напряжений с помощью АЦП Е 20-10, оснащенной пакетом PowerGraphs, и видеорегистрация движения дуги камерой CASIO EX-F1. Эксперименты без наложения внешнего магнитного поля показали, что по рельсам движение свободной дуги нестабильно: старт дуги замедлен, эрозия электродов значительна, токовый канал часто уходит на боковые поверхности рельсов. Показано, что управление внешним магнитным полем направленно движущейся дуги позволяет существенно (на два порядка) увеличить скорость ее перемещения, которая неплохо согласуется с расчетными данными по нуль-мерной нестационарной модели. При инициировании разряда в поле силы тяжести путем размыкания первоначально соприкасающихся электродов с высоким тепловым сопротивлением теоретически и экспериментально показана возможность образования многоканальных режимов протекания тока не только в узких зазорах, но (при наличии аксиального внешнего магнитного поля) и в достаточно протяженных (порядка нескольких десятков мм) промежутках.

Авторы признательны К.В. Шалееву за техническую поддержку при подготовке и проведении экспериментов и В.О. Герману за предоставленную возможность использования сконструированных им ранее магнитных систем.

К ТЕОРИИ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

А.М. Головин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Движение свободной броуновской частицы может быть исследовано по методу П. Ланжевена, что приводит к формуле Эйнштейна – Смолуховского и позволяет найти связь коэффициентов диффузии и подвижности.

В классической теории броуновского движения релаксационные процессы в дисперсных системах описываются уравнением Фоккера – Планка при допущении, что среда находится в состоянии термодинамического равновесия и остается в нем независимо от движения дисперсных частиц. Отказ от этого предположения, как показал Я.Д. Янков, приводит к принципиально новым представлениям о ходе релаксационных процессов в дисперсных системах.

РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ НА УСТАНОВКЕ П-2000 И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ

А.П. Головин, А.П. Глинов

НИИ механики МГУ, Москва

Предложен и реализован целый ряд технических решений по развитию экспериментальной базы установки П-2000. В частности, на основе батареи сильноточных аккумуляторов была создана автономная схема питания магнитной системы, стабилизирующей разряд. Разработана и реализована электротехническая схема, обеспечивающая устойчивую работу установки одновременно от двух независимых источников тока. Предложенное упрощение магнитной системы для стабилизации разряда за счет уменьшения числа стержней, создающих магнитное поле протекающими в ней токами, до трех позволило не только получить важные экспериментальные результаты о стабилизации протяженного разряда во внешнем магнитном поле, но и уточнить границы его устойчивости.

Проведена модернизация сильноточной плазменной установки П-2000 лаборатории общей гидромеханики с целью расширения круга решаемых задач, особенно в области сильноточной электрофизики. В частности, модернизирована система диагностики сильноточных токов на основе датчиков Холла типа ДТХ-3000, позволившая существенно упростить и повысить качество проводимых измерений. Предложена и реализована модернизация системы сильноточных водоохлаждаемых нагрузок, позволяющая обеспечивать плавное, а не только дискретное, регулирование величины балластного сопротивления электрических цепей испытываемых установок. Адаптируются методы измерения температуры электродов с помощью пирометра типам ДИЭЛТЕСТ 1200-2800, освоена высокоскоростная видеосъемка (до 4000 к/с), способные давать более подробную картину о динамике опорных пятен и процессах в них.

В совокупности это позволило получить большой объем важных для электрофизики и физики низкотемпературной плазмы экспериментальных данных, полученных в экспериментах, связанных как с формированием плазменных потоков и их движением в плотных газовых средах, так и со стабилизацией электрического разряда высокого давления внешним магнитным полем. Это также позволило расширить области существования стабильных разрядов и повысить точность анализа и интерпретации результатов экспериментов. В частности, получены данные об устойчивости протяженного (до 150 мм) дугового разряда во внешнем аксиальном магнитном поле и выявлены режимы возникновения винтовой неустойчивости с ростом величины внешнего магнитного поля и разрядного промежутка. Обсуждается способ измерений температуры поверхности электродов (вплоть до 4000 ^{o}C) с помощью комбинированной высокоскоростной съемки видеокамерой CASIO EX-F1 в выделенном спектральном диапазоне и пирометра ДИЭЛТЕСТ.

Авторы признательны К.В. Шалееву за проведенные электромонтажные работы по модернизации экспериментальной базы установки П-2000, П.В. Козлову за техническую поддержку при проведении экспериментов и В.О. Герману за предоставленную возможность использования сконструированных им ранее магнитных систем.

СТРОЕНИЕ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЛАСТЕРОВ ЗОЛОТА, СОДЕРЖАЩИХ ФОСФИНОВЫЕ ЛИГАНДЫ

М.Н. Голосная, Д.А. Пичугина, Н.Е. Кузьменко

Химический факультет МГУ, Москва

Кластеры золота, стабилизированные лигандами, привлекают значительный интерес исследователей, поскольку они могут рассматриваться как модельная система для понимания и оценки каталитических свойств наночастиц золота. Молекулярная формула и структура подобных кластеров известна, что позволяет соотносить наблюдаемые физико-химические свойства, в том числе каталитические, с параметрами кластера. Кластеры общей формулой $\left[(PR_3)_S Au_n X_m\right]^q$ содержат ядро Au_n и электроноакцепторные $X\,(X = –SR, – Hal)$ и другие группы $PR_3\,(R = –C_nH_{2n+1}, – C_6H_5)$. Стоит отметить, что роль стабилизирующих лигандов в каталитической активности кластеров до сих пор не установлена. Предположительно, частичное удаление лигандной оболочки способствует появлению активных центров в виде координационно-ненасыщенных атомов металла. С другой стороны, в некоторых случаях лиганды оказывают промотирующее действие или непосредственно участвуют в активации реагента и реакции. Таким образом, механизм каталитических реакций с участием $\left[(PR_3)_S Au_n X_m\right]^q$ до конца не установлен.

Настоящая работа посвящена моделированию окисления CO на $\left[Au_4(dpmp)_2(C\equiv CPh)_2\right]^{2+}$ ($dpmp$ – *бис*(дифенилфосфинометил)фенилфосфин) в скалярно-релятивистском подходе с релятивистским гамильтонианом Дирака – Кулона – Брейта в квантово-химической программе Priroda. Работа включала тестирование метода, расчет электронных свойств кластера, изучение взаимодействия данного кластера с кислородом и моделирование окисления CO молекулярным кислородом в присутствии $\left[Au_4(dpmp)_2(C\equiv CPh)_2\right]^{2+}$. Сравнение рассчитанных различными квантово-химическими методами (PBE0, TPSS, TPSSh) межатомных расстояний в кластере с данными РСА показало, что функционал PBE позволяет наиболее точно описывает геометрию кластера.

Были рассчитаны параметры кластера, характеризующие его стабильность: энергия связи, приходящаяся на один атом, разница энергий высшей заполненной орбитали

и низшей свободной молекулярной орбитали. По данным расчета, кластер $\left[Au_4(dpmp)_2(C\equiv CPh)_2\right]^{2+}$ является стабильным. Были рассмотрены различные способы координации O_2 относительно неэквивалентных атомов в кластере – вдоль связей $Au-Au$, $Au-P$ и $Au-C$. Среди найденных комплексов наиболее устойчивым является изомер, в структуре которого молекула кислорода встроена по связи $Au-C$. Стабильность данного комплекса подтверждается анализом ВЗМО орбиталей кластера. Не менее интересен и комплекс $O_2\left[Au_4(dpmp)_2(C\equiv CPh)_2\right]^{2+}$, в котором кислород встраивается по связи $Au-P$. Присоединение к нему CO приводит к образованию CO_2 с невысоким активационным барьером. В качестве альтернативного механизма рассмотрено окисление CO на кластере, предварительно активированным удалением одного из *dpmp*-лиганда.

Проведенное исследование демонстрирует возможность применения кластера $\left[Au_4(dpmp)_2(C\equiv CPh)_2\right]^{2+}$ для окисления CO и важную роль стабилизирующих групп в этом процессе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-03-00962).

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ДВУХЗВЕННОГО ФЛЮГЕРА

А.П. Голуб, Ю.Д. Селюцкий

НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается двухзвенный флюгер с вертикальной осью вращения, установленный в потоке сопротивляющейся среды. К первому и второму звену прикреплены спиральные пружины. На втором звене закреплена пластина симметричного профиля. Для описания аэродинамического воздействия на лопасть используется квазистатическая модель.

Проанализированы положения равновесия данной системы. Для положения равновесия, в котором оба звена вытянуты вдоль потока, построена область устойчивости в пространстве параметров. Проведено численное моделирование поведения системы, и исследована зависимость амплитуды и частот возникающих предельных циклов от параметров конструкции.

В аэродинамической трубе А-10 НИИ механики МГУ проведена серия экспериментов при различных скоростях набегающего потока, разных положений крыла, относительно второго звена и разных жесткостях пружин между звеньями. Данные экспериментов находятся в качественном согласии с теоретическими результатами.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ДОПУСТИМЫХ ОБЛАСТЕЙ ТОЧЕК ОПОРЫ ДВУНОГОГО РОБОТА НА НАКЛОННОМ ЦИЛИНДРЕ

Ю.Ф. Голубев [1,2], *Е.В. Мелкумова* [2]

[1]ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Исследуется задача о существовании заданного движения шагающего робота состоящего из корпуса и ног, опирающихся о шероховатый цилиндр радиуса R, с коэффициентом k сухого трения, в n точках опоры. Предполагается, что ноги робота совершают заданное движение относительно корпуса робота.

Пусть $\mathbf{F}$ – сумма даламберовых сил инерции и внешних активных сил, $\mathbf{M}$ – сумма моментов этих сил относительно неподвижной точки O. Ограничимся случаем, когда $\mathbf{F}$ не равно нулю и перпендикулярно $\mathbf{M}$. Система $\{\mathbf{F},\mathbf{M}\}$ приводится к равнодействующей в точке C. Точка C будет также точкой приложения равнодействующей реакций. Далее рассматривается задача о распределении реакций по точкам опоры в некоторый фиксированный момент времени в предположении, что $\mathbf{F}$ приложена в точке C, а силовой момент в этой точке отсутствует. Заметим, что эта задача эквивалентна задаче об удержании цилиндра пальцами руки робота манипулятора. Пусть ось цилиндра составляет угол a с $\mathbf{F}$. Работа продолжает исследования, в которых была рассмотрена проблема поиска решения задачи о распределении реакций при произвольном a. Уравнения кинетостатики дополняются квадратичными неравенствами, относительно параметра p, где p – разность компонент реакций вдоль оси цилиндра, E –совпадающий и не зависящий от a коэффициент при p в квадрате. Заметим, что для произвольной поверхности структура и свойства этих неравенств сохраняются. Аналитическое выражение четырех компонент нормальных и касательных составляющих реакций, лежащих в основании цилиндра, в двух точках опоры, через одну из продольных составляющих реакций, до ее замены на параметр p, теряет симметрию по параметру a для наклонного цилиндра, что обусловлено тем, что одна из точек опоры становится выше другой по углу a.

Проведено численное исследование, в котором по заданному положению ног и точки C определяется, существует ли решение задачи о распределении реакций и строятся области существования решений этой задачи. Например, для двуопорной фазы рассмотрены конфигурации робота, симметричные относительно точки C вдоль и поперек оси цилиндра. Для первых из перечисленных конфигураций рассмотрены три случая с неотрицательным коэффициентом E, для расстояния x, между точкой C и опорными точками: 0,9; 1,0 и 1,1 при $R=1$ и $k=1$, a от 0 до π (всего 13 различных величин угла наклона цилиндра). Построены области существования решения задачи о распределении реакций на плоскости двух углов, отвечающих проекциям точек опоры на основание цилиндра и трехмерные области, дополняющие указанную плоскость высотой центра масс. При a: 0; x: 1, область состоит из трех отдельно расположенных связных областей. На плоскости углов каждая из двух параллельных прямых соответствуют опоре на диаметр ортогональный оси цилиндра. Между этими прямыми расположена связная область. Она содержит отрезок прямой, соответствующий равенству углов, робот опирается на прямую, параллельную оси верхнего полуцилиндра, удовлетворяющей ограничению на отклонения от направления силы. Указанный отрезок на графиках исчезает при $x=0,9$ для $a=\pi/4$, а при увеличении x – позже, при $a=4\pi/9$. Это соответствует тому, что робот начинает скользить вниз по цилиндру. При $x=1,1$ для $a=\pi/3$ в трехмерных областях заметны расслоения из отдельных точек, что показывает более резкое изменение высоты расположения точки C при изменении углов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00131).

СЛАБЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ НА ПРЕМЕННОМ ФОНЕ

А.Н. Голубятников

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Развивается общий подход к решению задач о распространении слабых разрывов по известному фону для систем гиперболических уравнений, допускающих вариационную

формулировку. Слабая ударная волна рассматривается как приближение к решению, содержащему слабый разрыв. Данный метод может применяться к описанию различных адиабатических процессов (а также диссипативных, но с младшими производными) механики сплошной среды при наличии силовых полей. Лагранжиан и уравнения состояния считаются достаточно произвольными.

Решение со слабым разрывом разлагается в ряд Тейлора по степеням специальной временно́й переменной, равной нулю на ведущей характеристике, последняя предполагается невырожденной. На первом шаге решается обыкновенное дифференциальное уравнение Риккати (транспортное уравнение), определяющее скачок ускорения среды. Оно сводится к линейному, остальные уравнения для коэффициентов ряда – также линейны. Таким образом, решение последовательно представляется в квадратурах.

Приводятся примеры распространения слабых ударных волн на переменном фоне, допускающем группу симметрии (статическом степенном, нестационарном однородном), в рамках релятивистской газовой динамики. Уже решение уравнения Риккати позволяет исследовать классические вопросы возможного опрокидывания слабого разрыва, ускорения, затухания или усиления слабой ударной волны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 17-01-00037).

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА СИСТЕМЫ ПЛАВЯЩИХСЯ ЧАСТИЦ

А.Н. Голубятников, О.О. Иванов

НИИ механики МГУ, Москва

Методами статистической механики строится модель сплошной среды, состоящей из большой системы невзаимодействующих плавящихся частиц, находящихся в своем перегретом расплаве. Используется малый параметр, связанный с небольшой положительной разностью плотностей частиц и расплава, что характерно для металлов.

Сначала решается сферически-симметричная задача о плавлении частицы в неподвижной несжимаемой теплопроводной жидкости, когда плотности одинаковы. При ненулевой разности плотностей находится величина расхода жидкости и вычисляется действующая на частицу реактивная сила. С учетом сил вязкого сопротивления (учитываются линейный и квадратичный по скорости члены) решаются уравнения движения, допускающие интеграл, который можно назвать «интегралом изменения энергии». Он кладется далее в основу статистической теории. При достаточно большой разности температур расплава и частиц возможно неограниченное ускорение частицы.

Явно решается уравнение Лиувилля для плотности вероятности распределения невзаимодействующих частиц по радиусам и скоростям центров масс. Вычисляется статистический интеграл, который определяет свободную энергию «среды частиц». В случае термодинамического равновесия (малые частицы) можно считать, что статистическая температура движения частиц совпадает с температурой расплава. Составляются уравнения движения смеси.

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ СО СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ АННИГИЛЯЦИИ

А.Н. Голубятников, Д.Б. Любошиц

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В рамках специальной теории относительности методом обратной задачи строится ряд сферически-симметричных решений уравнений газовой динамики при наличии ударной волны аннигиляции. Предполагается, что аннигиляция происходит на поверхности разрыва путем полной реакции всех античастиц и соответствующей части обычных частиц, составляющих первоначальную смесь. Эта смесь имеет нулевое давление и одинаковую скорость компонент (пыль). Массовая концентрация античастиц считается заданной функцией лагранжевой переменной, например массы покоя.

Кроме этого, учитывается уходящее от ударной волны направленное излучение, не взаимодействующее с пылью, которое описывается волновым уравнением. Фронт этого излучения распространяется со скоростью света.

Задача о движении смеси перед волной аннигиляции полностью решается еще с двумя произвольными функциями лагранжевой переменной. В области за ударной волной используются известные точные решения релятивистской гидродинамики, обладающие дополнительной симметрией – равновесие, однородный разлет. Для инициирования аннигиляции допускается точечное выделение сосредоточенной энергии (сильный взрыв).

Рассматривается два типичных класса решений: формирование однородного разлета при первоначальном равновесии пыли и фокусировка пылевой смеси с образованием равновесия газа за ударной волной. В обоих случаях решение задачи сводится к обыкновенному линейному уравнению первого порядка, которое интегрируется в квадратурах. Параметрически исследуются различные предельные случаи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 17-01-00037).

ОБ УЧЕТЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В УРАВНЕНИЯХ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ

В.И. Горбачев

НИИ механики МГУ, Москва

Проведено осреднение нестационарной задачи неоднородной теории термоупругости. Найдены эффективные коэффициенты среды. Показано, что кроме известных коэффициентов в эффективные определяющие соотношения входят слагаемые, учитывающие скорость изменения во времени температуры и деформаций. На возможность учета подобных величин в классических определяющих соотношениях указывал еще академик Л.И. Седов. Показано, в частности, что учет скорости изменения температуры в задачах теплопроводности приводит к конечной скорости распространения тепловых возмущений.

О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ В ТЕОРИЯХ ПЛАСТИН КИРХГОФА – ЛЯВА, ТИМОШЕНКО И РЕЙСНЕРА

В.И. Горбачев, Л.А. Кабанова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Для сведения трехмерной задачи теории упругости для тонкой пластины к двумерной задаче использован метод кинематических и статических гипотез. Рассмотрен общий способ выдвижения кинематических гипотез, основанный на разложении перемещений в окрестности срединной плоскости пластины в ряд Тейлора и на физических предположениях о поведении поперечного волокна пластины в процессе деформации срединной плоскости. Приведены явные выражения для распределения перемещений в пластины в случае гипотезы Кирхгофа – Лява, Тимошенко и Рейснера. Уравнения для внутренних силовых факторов выводятся из трехмерных уравнений теории упругости путем их интегрирования по поперечной координате. Такой подход позволяет, без особых затруднений, получить по заданным внешним силам выражения для статически эквивалентных сил и моментов, распределенных в срединной плоскости пластины. Далее подробно, чисто формально, рассмотрена только теория пластин Кирхгофа – Лява из неоднородных анизотропных материалов. Получены выражения для продольной, изгибных и жесткостей взаимного влияния. Выписаны системы двумерных дифференциальных уравнений в частных производных деформации срединной плоскости пластины. Из вариационного принципа Лагранжа получены возможные типы граничных условий.

ТЕПЛОВОЙ УДАР ПО ТОРЦУ НЕОДНОРОДНОГО СТЕРЖНЯ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ

В.И. Горбачев, А.А. Корсаков

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Получена интегральная формула, по которой решение нестационарной задачи термоупругости для неоднородного стержня с переменным поперечным сечением выражается через решение такой же задачи для однородного стержня с постоянным сечением.

Эта формула затем используется для решения задачи о тепловом ударе по торцу стержня.

О ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ В ТЕОРИЯХ СТЕРЖНЕЙ БЕРНУЛЛИ – ЭЙЛЕРА, ТИМОШЕНКО И РЕЙСНЕРА

В.И. Горбачев, Т.М. Мельник

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Для сведения трехмерной задачи теории упругости для тонкого стержня к одномерной задаче использован метод кинематических и статических гипотез. Рассмотрен общий способ выдвижения кинематических гипотез, основанный

на разложении перемещений в окрестности осевой линии стержня в двумерный ряд Тейлора и на физических предположениях о поведении поперечного сечения стержня в процессе его деформации. Приведены явные выражения для распределения перемещений в стержне в случае гипотезы Бернулли – Эйлера, Тимошенко и Рейснера. Уравнения для внутренних силовых факторов выводятся из трехмерных уравнений теории упругости путем их интегрирования по поперечному сечению. Такой подход позволяет, без особых затруднений, получить по заданным внешним силам выражения для статически эквивалентных сил и моментов, распределенных вдоль оси стержня. Далее подробно, чисто формально, рассмотрена только теория стержней Бернулли – Эйлера из неоднородных анизотропных материалов. Получены выражения для продольной, изгибных и жесткостей взаимного влияния. Выписаны системы обыкновенных дифференциальных уравнений деформированной оси стержня. Из вариационного принципа Лагранжа получены возможные типы граничных условий.

ТЕПЛОВОЙ УДАР ПО НЕОДНОРОДНОМУ ПО ГЛУБИНЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВУ

В.И. Горбачев, Е.Ю. Назарова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Решение динамической задачи для неоднородного по глубине полупространства, на границе которого осуществляется тепловой удар, ищется с помощью интегральной формулы представления исходной задачи через решение такой же задачи только для однородного полупространства (задача Даниловской). Получены приближенные аналитические формулы для случая теплового удара по полупространству с инородным покрытием. Проведено сопоставление найденного решения с известным из литературы аналогом.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В НЕДОРАСШИРЕННЫХ СТРУЯХ АЗОТА В ВЧ-ПЛАЗМОТРОНЕ

А.Н. Гордеев [1], *А.Ф. Колесников* [1], *В.И. Сахаров* [2]

[1]ИПМех РАН, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

На индукционном плазмотроне ВГУ-4 проведены эксперименты по теплообмену в недорасширенных сверхзвуковых струях высокоэнтальпийного азота. Для условий экспериментов в сверхзвуковых режимах численным методом выполнено моделирование течений плазмы азота в разрядном канале плазмотрона и обтекания недорасширенными струями цилиндрической модели с плоским торцом. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных по давлениям торможения и тепловым потокам к охлаждаемым поверхностям металлов, графита и кварца.

Эксперименты в сверхзвуковых режимах ВГУ-4 проводились в недорасширенных струях высокоэнтальпийного азота, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходного сечения $D = 30$ и 40 мм. Теплообмен водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским носком диаметром 20 мм с высокоэнтальпийной недорасширенной струей азота при давлении в барокамере 10,4 гПа экспериментально

исследован в четырех режимах установки ВГУ-4: 1) D = 30 мм, Nap = 45 кВт, G = 2,4 г/с; 2) D = 30 мм, Nap = 64 кВт, G = 3,6 г/с; 3) D = 40 мм, Nap = 45 кВт, G = 2,4 г/с; 4) D = 40 мм, Nap = 64 кВт, G = 3,6 г/с.

Для тех же четырех режимов ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 моделировались течения в разрядном канале плазмотрона с индукционным нагревом газов и в истекающих недорасширенных струях диссоциированного и частично ионизованного азота.

Применялась технология, основанная на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье – Стокса [1] и специальных программ-генераторов, взаимодействующих с базами данных по термодинамическим и переносным свойствам индивидуальных газовых веществ [2].

Экспериментально продемонстрирован эффект сильного влияния каталитической рекомбинации атомов азота на тепловой поток к охлаждаемой поверхности. Тепловой поток к высококаталитичным поверхностям меди и нержавеющей стали в четыре раза превышает тепловой поток к поверхности кварца. Установлена качественная каталитическая шкала материалов по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов N: медь ~ нержавеющая сталь > графит > кварц.

Экспериментальные и расчетные данные по тепловым потокам к высоко каталитическим холодным поверхностям и давлению в точке торможения на цилиндрической модели с плоским носком в первой сверхзвуковой зоне недорасширенной струи диссоциированного азота удовлетворительно согласуются.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00054).

Литература

1. *Afonina N.E.* HIGHTEMP technique of high temperature gas flows numerical simulations / *N.E. Afonina, V.G. Gromov, V.I. Sakharov* // European Space Agency (Special Publication) ESA SP 5th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles: SP 563. – Noordwijk: ESTEC, 2004.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. В.П.Глушко. – М.: Наука, 1978.

ФОРМИРОВАНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ МОЛНИЙ

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ, Москва

Во время эксплозивных извержений одним из самых зрелищных явлений являются молнии, образующиеся в пепловой колонне. Они довольно часто наблюдаются при крупных извержениях. Вулканические молнии представляют интерес как с точки зрения их опасности для человека и техники, так и с точки зрения их влияния на электромагнитное поле планеты, атмосферу и климат. В процессе взрывного извержения основным способом электризации частиц пепла является трение и столкновение частиц, при этом процессы электризации должны преобладать над процессами диссипации зарядов. Для образования молнии необходимо достижение некоторой критической разности потенциалов. Это осуществляется за счет того, что одноименно заряженные частицы группируются в области с суммарными положительным и отрицательным зарядами. Было показано теоретически и экспериментально, что в результате обмена зарядами при столкновениях мелкие частицы заряжаются преимущественно отрицательно, а крупные – положительно. В дальнейшем их пространственное разделение происходит за счет конвекции под действием силы тяжести (аналогично процессам разделения зарядов

в грозовом облаке) и кластеризации частиц в областях с пониженной скоростью при турбулентном течении смеси пепел-газ (размеры частиц существенно влияют на их поведение в вихревом течении).

На данный момент не существует математических моделей, адекватно описывающих процесс формирования вулканических молний. Поэтому моделирование вулканических молний позволит получить более точное представление о процессах, происходящих при крупных эксплозивных (взрывных) извержениях вулканов.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОЗВЕЗД, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ОБЛАКАМИ

В.Д. Горячев [3], *Б.П. Рыбакин* [1,2], *Л.И. Стамов* [1,2], *Н.Н. Смирнов* [1,2]

[1]МГУимени М.В. Ломоносова, Москва;
[2]ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва;
[3]ТвГТУ, Тверь

Распространение и столкновение ударных волн с молекулярными облаками (МО) играет важную роль в цепи событий, приводящих к образованию звезд. Газ облаков, при прохождении через них ударных волн, сжимается на несколько порядков. Это приводит к фрагментации и перестройке их структуры. Газ перераспределяется в сети уплотненных волокон (филамент) и пленок. На достаточно малых масштабах внутри таких облаков (обычно около 1 парсека), преобладает сила тяжести, и формирование звезд происходит в многочисленных плотных газовых «ядрах», в пределах этих филамент, которые входят в кластерообразующие области. В работе приводятся результаты численного моделирования процесса взаимодействия ударной волны с системой из двух молекулярных облаков. Возникающие при этом турбулентные движения газа становятся доминирующим фактором структурирования областей с повышенной плотностью, часть сгущений становятся протозвездами. Возникающие гравитационно-связанные системы со временем коллапсируют в новые звезды. Основная часть облаков рассеивается в результате трансформации кинетической энергии падающей ударной волны. В работе обсуждается параллельный алгоритм расчета процесса взаимодействия ударной волны с молекулярными облаками. Моделирование осуществлялось на численных сетках большого разрешения (2048×1024×1024) в трехмерной постановке. Проведение численных экспериментов на достаточно подробных сетках требует совершенствования вычислительных алгоритмов, их параллелизма и значительных вычислительных ресурсов.

Для проведения расчетов был разработан параллельный алгоритмы решения задач вычислительной газодинамики. Для ускорения вычислений были использованы технологии OpenMP для центральных процессоров, и CUDA для графических ускорителей. Повышение разрешения вычислительных сеток позволяет найти и проследить возникающие возмущения, абляцию и развитие неустойчивости в МО. В работе исследованы процессы распространения в МО ударных волн, унос вещества и фрагментация уплотнений газа, образование неустойчивости Рихтмайера – Мешкова, проанализировано развитие и разрушение вихрей при взаимодействии ударной волны с молекулярными облаками

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОГО СЛОЯ СО ШТАМПОМ, ОБЛАДАЮЩИМ ПОВЕРХНОСТНЫМ РЕЛЬЕФОМ

И.Г. Горячева [1], *И.В. Тюрин* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассмотрена контактная задача о внедрении системы N штампов заданной формы в деформируемый слой, моделирующий мягкие ткани. Задача является актуальной в медицине ввиду потребности улучшения имеющихся хирургических инструментов. Исследования проводились путем численного моделирования в конечно-элементной среде. Изучалось напряженное состояние слоя при различных формах рельефа поверхности штампа, моделируемого системой выступов. При этом варьировались: количество выступов (4 или 6), геометрическая форма отдельного выступа (цилиндрическая, имеющая в сечении полукруг; прямоугольная со скругленными кромками, треугольная со сглаженной вершиной), а также расстояние между выступами. В качестве модели слоя рассматривались линейно и нелинейно упругие материалы. Задача решалась в плоской постановке. На основании полученных результатов проведен анализ влияния формы выступа и плотности их расположения на величину максимальных контактных и внутренних напряжений при заданной величине внедрения штампа в исследуемый материал, а также на зависимость внедрения штампа от приложенной нагрузки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект№ 16-58-52033).

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ С МНОГОВИТКОВЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ МАЛОЙ ТЯГОЙ

И.С. Григорьев [1], *М.П. Заплетин* [1,2], *А.С. Самохин* [1,2], *М.А. Самохина* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]РУДН, Москва

Рассматривается задача оптимального управления межпланетным пространственным перелетом космического аппарата (КА) между Землей и Марсом. Орбиты Земли и Марса считаются круговыми, не лежащими в одной плоскости. Перелет КА начинается на круговой орбите искусственного спутника Земли (КО ИСЗ), заканчивается на круговой орбите искусственного спутника Марса (КО ИСМ). Положение КА на КО ИСЗ в начальный момент времени и на КО ИСМ в конечный момент времени оптимизируется. Разгон КА около Земли и торможение около Марса, осуществляемые реактивными двигателями большой тяги, аппроксимируются импульсными воздействиями. На оставшейся части траектории управление КА осуществляется посредством вектора тяги реактивного двигателя малой тяги. В связи с учетом эффекта потери точности при решении задачи используются инерциальная гелиоцентрическая, неинерциальные вращающиеся геоцентрическая и марсоцентрическая системы координат. Минимизируется время перелета.

Рассматриваемая задача формализуется как задача оптимального управления переменной структуры. На основе принципа максимума Понтрягина ее решение сводится к решению краевой задачи 42-го порядка. Краевая задача решается численно методом стрельбы с подбором 13 параметров. Корень вектор-функции невязок находится методом Ньютона с модификацией Исаева – Сонина и использованием в условиях сходимости

нормировки Федоренко. Задачи Коши в методе стрельбы решаются численно явным методом Рунге – Кутты 8-го порядка, основанным на расчетных формулах Дормана – Принса 8(7) с автоматическим выбором шага.

Основной результат: поставленную задачу удалось решить. В результате решения краевой задачи определены экстремали Понтрягина, проводится их анализ в зависимости от параметров задачи. При расчетах рассматривались различные КО ИСМ. В частности, удалось построить экстремали Понтрягина в задачах перехода на КО ИСМ, приближающие орбиты Фобоса и Деймоса, без импульсного воздействия в конечный момент времени. При этом на полученных траекториях КА на заключительном участке совершает 66 и 19 оборотов вокруг Марса соответственно.

Траектория строится при помощи продолжения по параметрам решения плоского случая задачи. Использование комбинации двигателей большой и малой тяги позволяет увеличить полезную массу и, как следствие, делает проект более дешевым, что актуально в настоящее время. Экспедиции к Марсу и его естественным спутникам могут помочь приблизиться к решению широкого спектра научных задач физики Солнечной системы.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕЛЕТА КА С НИЗКОЙ КРУГОВОЙ ОРБИТЫ ИСЗ СО СБРОСОМ ОТРАБОТАННЫХ СТУПЕНЕЙ В АТМОСФЕРУ

И.С. Григорьев [1], *А.И. Проскуряков* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова, Баку

Очистка околоземного пространства от космического мусора, представляющего реальную угрозу функционирующим космическим аппаратам (КА), является одной из актуальных проблем современности. В работе рассматривается идея сокращения замусоренности околоземного пространства за счет сброса отработанных ступеней в атмосферу Земли.

Рассматриваются гомановские и биэллиптические схемы перевода КА на геостационарную орбиту и на орбиту с заданным импульсом довыведения. Задача решается в импульсной постановке с дополнительным предположением, что все импульсные воздействия подаются в апсидальных точках орбиты. КА состоит из двух ступеней и спутника. Масса двигателя не учитывается, сухая масса ступени считается пропорциональной массе находящегося в ней топлива. Предполагается, что в ступени залито столько топлива, сколько достаточно на выделенную для этой ступени части маневра и дополнительное импульсное воздействие, переводящее КА на орбиту, касающуюся границы атмосферы Земли. Максимизируется масса спутника на конечной орбите.

Задача решается численно. Проводится параметрический анализ полученных решений. Оказалось, что при переходе на ГСО в случае гомановского перелета максимум полезной массы достигается при разделении установочного импульса, в случае биэллиптического перелета – при сбросе ступени на протяженном пассивном участке – сбросе первой ступени на первой переходной орбите (в ситуации отсутствия разделения импульсов).

В задаче перехода на целевую орбиту эллиптическую орбиту с заданным импульсом довыведения проведены первые расчеты.

О МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НИИ МЕХАНИКИ МГУ «УДАРНАЯ ТРУБА «КВАДРАТ»

Ю.И. Гринь

НИИ механики МГУ, Москва

При экспериментальном исследовании быстропротекающих импульсных газодинамических процессов, таких как взаимодействие распространяющихся ударных волн с препятствиями или газовыми неоднородностями, необходимым является обеспечение функционирование различных управляющих элементов адекватной синхронизацией. Распространенным способом получения первичного сигнала синхронизации является использование электрического сигнала пьезодатчика давления, расположенного заподлицо в стенке ударной трубы. Однако запуск различных элементов установки в различные необходимые моменты времени, таких как блок инициирования газового разряда для создания тепловой газовой неоднородности, цифровой визуализирующей фотокамеры, осциллографов, импульсного лазера системы лазерного ножа или лазерной подсветки при прямотеневом методе визуализации, затруднен при различных скоростях ударных волн от опыта к опыту. Для обеспечения возможности исследования взаимодействия ударных волн в экспериментальной секции в поле зрения системы визуализации разработана, изготовлена и тестирована система генерирования сигнала синхронизации с временной задержкой, зависящей от скорости ударной волны. В этой системе с помощью сигналов двух или трех пьезодатчиков, расположенных по ходу падающей ударной волны, определяется скорость падающей ударной волны и вырабатывается синхронизирующий сигнал, соответствующий моменту прихода ударной волны в избранное место при произвольной скорости падающей ударной волны. Устройство существенным образом позволяет избежать проведение «пустых» экспериментов, когда приход ударной волны не синхронизован с работой блоков управления и регистрации параметров взаимодействия.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1), РНФ (проект № 14-19-01759) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ НА ПОРИСТОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

К.П. Гурьев, А.В. Звягин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В связи с ростом современных технологий в сфере транспорта и строительства особый интерес представляет взаимодействие движущейся нагрузки со свободной поверхностью. Задача о действии подвижной сосредоточенной нагрузки имеет большое прикладное значение, поскольку фактически определяет фундаментальное решение, базовое для целого класса контактных динамических задач. В данной работе рассматривается воздействие движущейся сосредоточенной нагрузки на пористо-упругую среду. В середине XX в. М. Био развивал теорию пористых сред, насыщенных жидкостью. Модель Био наиболее часто используется в задачах фильтрации. Для задач распространения волн Х.А. Рахматулиным была разработана модель, опирающаяся

на результаты М. Био и адаптированная для решения волновых задач. В рамках данной модели и решается задача.

В данной работе рассмотрено движение внезапно возникшей сосредоточенной нагрузки с постоянной скоростью, меньшей скорости распространения поперечных волн в данной пористо-упругой среде. В этом случае математическое моделирование данной задачи сводится к решению системы уравнений в частных производных эллиптического типа. С помощью интегральных преобразований Фурье и Лапласа, а также с помощью метода Каньяра удалось получить аналитическое решение задачи.

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ УПРУГОЙ СРЕДЕ

С.А. Давыдов [1], *А.В. Земсков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В работе рассматривается одномерная задача термоупругости с учетом диффузии для однородных многокомпонентных сред (слой или полупространство) при нестационарных поверхностных возмущениях. Математическая постановка задачи в прямоугольной декартовой системе координат представляет собой связанную систему уравнений в частных производных, состоящую из уравнений движения сплошной среды и уравнений тепло- и массопереноса. На границах среды задаются: нестационарное перемещение, тепловой поток и диффузионные потоки. В случае полупространства один из наборов граничных условий заменяется на условие ограниченности искомых величин в рассматриваемой области. Начальные условия нулевые.

Решение ищется в интегральной форме, которая представляет собой свертку по времени функций Грина с правыми частями граничных условий. В задаче для слоя при нахождении функций Грина используется преобразование Лапласа по времени и разложение искомых функций в неполные ряды Фурье, что сводит задачу в изображениях к системе линейных алгебраических уравнений относительно искомых функций. В задаче для полупространства вместо разложения в ряды Фурье применяется синус-, косинус-преобразование Фурье. Трансформанты искомых функций являются рациональными функциями параметра преобразования Лапласа. Их оригиналы находятся с помощью известных теорем операционного исчисления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00663).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ТКАНЕЙ ЗУБОЧЕЛЮСТНОГО СЕГМЕНТА В ОКРЕСТНОСТИ ЭНДОДОНТО-ЭНДООССАЛЬНОГО ИМПЛАНТАТА

М.В. Джалалова [1], *А.Г. Степанов* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва; [2]Кафедра клинической стоматологии № 2
ГБОУ ВПО МГМСУ имени А.И. Евдокимова МинЗдрава России, Москва

Наиболее часто эндодонто-эндооссальные имплантаты используются в комплексной терапии заболеваний пародонта для стабилизации подвижного зуба, лечении травмы зубов, иногда и при операции резекции верхушки корня. Основным преимуществом эндодонто-эндооссальной имплантации является сохранение циркулярной

связки зуба и части периодонта. Армирование подвергшихся резекции корней зубов такими имплантатами улучшает их биомеханические показатели. Подобные имплантаты имеют достаточную прочность – благодаря им жевательная нагрузка перераспределяется равномерно на опорные ткани зуба и костную ткань, чем достигается восстановление жевательной функции зуба. На разработанной математической модели проведено численное исследование методом конечных элементов зависимости перемещений эндодонто-эндооссального имплантата (ЭЭИ) и напряжений в окружающей его костной ткани от различных уровней резекции корня зуба и приложенной функциональной нагрузки, действующей вертикально на окклюзионную поверхность зуба.

Задача рассматривалась в осесимметричной постановке. Компьютерная модель зубочелюстного сегмента включала десну, однокорневой зуб-премоляр, эндодонто-эндооссальный имплантат, периодонт, компактную кость альвеолы, губчатую кость, с учетом механических свойств материалов каждого из элементов системы. Рассмотрено несколько вариантов резекции корня зуба: удаление 1/3 корня, 1/2 и 2/3 на 1-м и 2-м этапах после установки имплантата. Первый этап представляет собой небольшой промежуток времени, когда после установки имплантата еще не произошла его остеоинтеграция с костной тканью; второй этап – остеоинтеграция имплантата с костной тканью произошла и удаленный объем заполнился губчатой костью. В данной работе приводится сравнительный анализ с проведенными ранее исследованиями, в которых методом конечных элементов аналогично исследовались зависимости напряженно-деформированного состояния трансдентального имплантата и окружающей его костной ткани от различных уровней резекции корня зуба и приложенной вертикальной нагрузки к окклюзионной поверхности на 1-м и 2-м этапах после установки имплантата.

Полученные зависимости позволили сделать основной вывод о том, что при серьезных проблемах допустимыми резекциями корня зуба являются 1/3, 1/2 и даже ампутация 2/3, при которой все показатели на 2-м этапе весьма незначительно отличаются от аналогичных при резекции 1/3 и 1/2. Тем не менее на 1-м этапе необходим более щадящий режим, нагрузки на зуб с поставленным имплантатом желательно не должны быть большими в течение времени, требуемого полной остеоинтеграции ЭЭИ с костной тканью.

Сравнение эндодонто-эндооссальных имплантатов с трансдентальными показало, что на 1-м этапе по всем параметрам лучше ЭЭИ, но на 2-м этапе значения напряжений и перемещений при уровне резекций 1/3 и 1/2 практически не отличаются, только при ампутации 2/3 перемещение ΔY у ЭЭИ меньше на 11 %.

МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕКСТОВОГО СОДЕРЖИМОГО ИНТЕРНЕТ-САЙТОВ С ИХ ПОСЛЕДУЮЩИМИ КЛАССИФИКАЦИЕЙ И АНАЛИЗОМ

М.Д. Дзабраев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Современное интернет-пространство содержит большое количество данных. Существует исследование, согласно которому объем информации в интернет-пространстве увеличивается вдвое каждые два года. Анализ увеличивающейся массы информации представляется важным как для обеспечения государственной безопасности, так и для коммерческих сфер.

Большой интерес представляет информация, размещенная на веб-сайтах. Для анализа информации на веб-сайте в первую очередь необходимо обладать механизмами, при помощи которых информацию возможно извлечь из веб-сайта.

Современные веб-сайты являются интерактивными: от того, как пользователь будет взаимодействовать с веб-сайтом, будет зависеть, какой контент будет отображен. В связи с этим, чтобы извлечь максимальное количество информации, необходимо, чтобы программное средство в автоматическом режиме имитировало работу пользователя.

Имитация работы пользователя представляет из себя:

· автоматическое обнаружение элементов веб-страницы, с которыми пользователь может взаимодействовать посредством мыши или клавиатуры;

· автоматическое взаимодействие с найденными элементами, при помощи автоматической генерации событий, которые мог создать пользователь.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МЕЖДУ ДВУМЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ ОРБИТАМИ

Р.А. Доронин, М.П. Заплетин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В данной работе было рассмотрено два способа перелета космического аппарата между двумя эллиптическими орбитами. Первый перелет посредством идеально регулируемой тяги, второй двух импульсный. В обоих способах перелета были сделаны следующие модельные предпосылки: Земля рассматривалась как материальная точка, размеры космического аппарата существенно меньше размеров орбиты, что позволяло рассматривать космический аппарат как материальную точку, математическая модель перелетов рассматривалась в полярной системе координат, что упрощало вид уравнений орбит и вывод функционала для двух импульсного перелета. При перелете с идеально регулируемой тягой предполагалось, что на космический аппарат действуют сила притяжения земли и тяга самого космического аппарата, на вектор которой не накладывалось ограничений ни по величине, ни по направлению. При двух импульсном перелете действовала только сила притяжения земли.

Используя модельные предпосылки, законы механики и аналитическую геометрию была поставлена задача оптимального управления (перелет с идеально регулируемой тягой), которая в силу принципа максимума сводилась к краевой задаче. Для двух импульсного перелета был составлен функционал, который сопоставлял параметрам начальной и конечной орбиты, точке отлета и прилета величину затрачиваемого импульса. Далее применялся численный анализ на ЭВМ с использованием программы Wolfram Mathematica для решения краевой задачи и нахождению минимума функционала. Аргументы минимума функционала использовались для задания начальных условий краевой задачи.

Численно было показано, что оптимальная точка старта и прилета для двух импульсного перелета не соответствует оптимальной точки старта и прилета посредством идеально регулируемой тяги. Так же было показано, что двух импульсный перелет выгоднее в окрестности точки старта и прилета, полученных как аргументы минимизации функционала двух импульсного перелета.

КОЛЕБАНИЯ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ

М.З. Досаев

НИИ механики МГУ, Москва

Рассмотрен контакт тормозной колодки с движущимся телом в 2 различных точках. Колодка прижимается к телу в направлении перпендикулярном движению тела. Податливость колодки в точках контакта с телом моделируется с помощью упругих пружин. Сила трения определяется законом Кулона.

Предложена нелинейная постановка задачи. Рассмотрена устойчивость равновесия колодки по первому приближению. Найдены диапазоны механических параметров, при которых равновесие колодки неустойчиво, при этом возмущенное движение может иметь характер автоколебаний с нарастающей амплитудой. Для моделирования траекторий нелинейной системы создана программа расчета.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-06970).

ПРИМЕНЕНИЕ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЧИСТКИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ОТ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

П.А. Дьяков, А.А. Малашин, Н.Н. Смирнов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

За последнее время сильно возросло количество исследований и экспериментов по применению тросовых систем в условиях космоса. Подобные системы – эффективный способ перемещения полезной нагрузки без затрат топлива. Также они могут применяться для удаления нежелательных объектов с используемых орбит (элементов космического мусора, устаревших космических аппаратов, отработанных частей систем и др.).

Применение тросовой системы в качестве средства очистки орбиты от элементов космического мусора было предложено В.А. Чоботовым в 2004 г. Система предполагала возможность перемещения контейнеров с пойманными элементами мусора на более низкую или высокую орбиту. Сама система состоит из «большого» спутника (спутник-ловушка), двух «малых» спутников (спутники-противовесы) и кевларового троса, натянутого между ними. Длина троса составляет 30 км. Система стабилизирована вдоль местной вертикали в направлении от «большого» спутника к Земле, другая часть – по направлению к более высокой орбите (орбите захоронения). Маленький груз (контейнер с пойманным мусором) двигается по тросу от «большого» спутника к «малым».

В работе предлагается, что при достижении грузом «малых» спутников изменение массы фиксирует специальное устройство. При достижении некой критической массы, накопленной на конце троса (нескольких грузов), грузы выпускаются в направлении Земли (чтобы сгореть в атмосфере) или в направлении орбиты захоронения, где не будут представлять угрозы для действующих космических миссий.

Подобное сложное движение грузов, спутников и троса приводит к возникновению нежелательных продольно-поперечных колебаний, которые могут привести к отклонению грузов и обрыву троса. Поэтому процесс развертки системы на орбите и процесс спуска требуют контроля специальным оборудованием и стабилизации. Условия стабилизации системы вдоль местной вертикали были получены аналитически и подтверждены численными расчетами.

При определенных соотношениях на массы груза и «малого» спутника и величине начальной скорости груза процесс спуска груза является квазистатическим. Влияние динамических эффектов в тросе мало по сравнению с действием внешних для системы сил (силы Кориолиса, инерции, гравитационного взаимодействия с Землей). При таких условиях можно осуществить перемещение груза по тросу без дополнительной стабилизации и угрозы большого отклонения от местной вертикали или обрыва троса.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МОДЕЛИ ДРОБЛЕНИЯ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ И ИХ СВЯЗЬ С ОЦЕНКОЙ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Л.А. Егорова, В.В. Лохин

НИИ механики МГУ, Москва

Наблюдения за полетом метеорных тел с помощью наземных и орбитальных станций фиксируют интенсивность их свечения вдоль траектории. Результаты наблюдения обычно представляют в виде графика – кривой светимости. Для крупных метеороидов (более 10 см в диаметре) часто регистрируют резкое возрастание его свечения в конце полета, так называемую «концевую вспышку».

В настоящее время появляется все больше работ, моделирующих вход и разрушение метеорных тел в атмосфере. Мы рассмотрели наиболее интересные из этих работ, хорошо моделирующие наблюдательные данные. В работе [1] выделено 4 вида взаимодействия метеорных тел с атмосферой: «1) кратерообразующий удар (когда космическое тело, быть может даже сильно раздробленное, достигает поверхности Земли и образует кратер); 2) поверхностный гигантский болид (ГБ) или, другими словами, поверхностный «метеорный взрыв» (когда высокоскоростная струя, состоящая из мелких фрагментов и паров метеороида и нагретого в ударной волне воздуха, ударяет по поверхности Земли, не образуя кратера); 3) воздушный ГБ или воздушный «метеорный взрыв» (когда продукты полностью разрушенного и испаренного метеороида тормозятся в атмосфере и не достигают поверхности Земли, но ударная волна и тепловое излучение производят заметные разрушения и пожары); 4) обыкновенные метеорные явления (которые могут наблюдаться с Земли и из космоса, но не оставляют заметных следов на поверхности Земли)». И далее рассмотрен третий вид взаимодействия. Для тел размером Челябинского проведено моделирование, разрушенный на высоте около 15 км болид на высоте 10 км полностью испаряется, образуется высокоскоростная газовая струя, которая затем моделируется численно.

В работе [2] приводится численное моделирование уравнений движения и испарения метеорных тел различных моделей дробления – жидкостной модели «блин», модели дробления с коллективной и различными ударными волнами и смешанная модель. Подбирая свободные параметры задачи удалось получить совпадение с данными наблюдений для Челябинского события.

В этих работах, однако, не дано объяснение появлению выделившейся тепловой энергии после дробления. Поэтому далее нами предложена следующая простая модель разрушения. Во-первых, дробление метеороида на множество осколков. После дробления осколки разрушившего тела за короткий период времени (полета) нагреют некоторый объем газа (окружающего воздуха и паров тела) до высокой температуры. Кинетическая энергия движущихся частиц метеороида переходит в тепловую энергию объема газа, в котором происходит их движение.

Литература

1. *Шувалов В.В.* Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности Земли ударами астероидов размером 10-300 / *В.В. Шувалов, В.В. Светцов, И.А. Трубецкая* // Астр. вест. – 2013. – Т. 47. – № 4.
2. *Register P.J. et all.* // Icarus, 2017, v. 284.

КАЧЕНИЕ ЦИЛИНДРА ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

В.А. Ерошин, А.В. Бойко, Е.А Архангельский

НИИ Механики МГУ, Москва

Рассмотрена задача о качении негладкого цилиндра по свободной поверхности воды. Проведено моделирование явления качения колеса по свободной поверхности и анализ размерностей определяющих параметров, получены безразмерные комбинации, описывающие это явление. В качестве модели колеса на начальном этапе использовался цилиндр с плицами, расположенными вдоль боковой поверхности (образующих цилиндра), которые имитировали протектор колеса. Получены первые опытные данные о зависимости безразмерной глубины погружения («осадки») цилиндра от нагрузки на ось и числа Фруда.

О ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВХОДЕ ТЕЛА В ВОДУ

В.А. Ерошин, В.А. Самсонов

НИИ механики МГУ, Москва

Обсуждается процесс косого входа в воду твердого тела (круглого цилиндра) с плоским передним торцом. Процесс рассматривается, как ударный. Величина продольного ударного импульса, действующего со стороны воды на тело, и линия его действия определяется в соответствии с формулами абсолютно неупругого удара. Для оценки величины поперечного ударного импульса привлекается экспериментальная информация об угловой скорости, приобретаемой телом при входе в воду. Хотя поперечный импульс на порядок меньше продольного, его хватает для придания телу боковой скорости. Это качественно соответствует наблюденным в экспериментах тенденциям «всплывания» тел на подводном участке траектории.

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА СЪЕМКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.Т. Жакыпов [1], *М.П. Заплетин* [1,2]

[1]Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

В данной работе описывается приложение для определения орбиты спутника дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и возможности съемки участка поверхности Земли. С помощью этого приложения пользователь может определить траекторию движения любого доступного коммерческого спутника ДЗЗ на заданный период времени,

а также составить оптимальный план съемок, удовлетворяющих требованиям пользователя, для съемки указанной территории определенным космическим аппаратом.

Интерфейс приложения содержит поля ввода данных, вывода результатов и трехмерную модель Земли для наглядной визуализации. В качестве входных данных для построения орбиты требуется выбрать космический аппарат, начальную и конечную даты. Для планирования съемки интересующей территории нужно еще ввести саму территорию в виде либо точки, либо полигона, максимальный допустимый угол съемки и минимальный угол Солнца над горизонтом. Результат будет визуализирован на трехмерной модели Земли в основном окне.

Вычислительная часть основана на модели SGP4, использующей общедоступные данные TLE для спутников ДЗЗ. Эта модель позволяет рассчитать положение космического аппарата в указанный момент времени. Таким образом, для построения орбиты производится расчет положения спутника по этой модели с некоторым шагом по времени. При планировании съемок участка поверхности Земли используются тот же подход вместе с преобразованиями времени и координат и эвристическими алгоритмами для сокращения вычислительной нагрузки. Кроме того, для достижения высокой точности определения метрических величин применялись формулы сферической тригонометрии. В качестве одного из задаваемых пользователем ограничений присутствует угол Солнца над горизонтом, который вычисляется динамически и зависит от времени и координат точки. Если пользователю интересны ночные пролеты, то он может задать отрицательную величину угла Солнца, например -90.

Код программы написан на языках программирования JavaScript и PHP. Само приложение развернуто на сервере Apache2. Выбор средств программирования продиктован их нынешней популярностью в среде вебразработок и отсутствием проблем совместимости со всеми современными интернет-браузерами. При создании интерфейса были использованы вспомогательная библиотека Cesiumjs, которая отвечает за визуализацию модели Земли и полета космического аппарата, для чего координаты положения спутника в пространстве, полученные в результате работы модели SGP4, конвертируются в формат czml.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕКАЧКИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН К НИЗКОЧАСТОТНЫМ В УСТОЙЧИВОМ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ

Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова

НИИ механики МГУ, Москва

Численно исследованы течения вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое, вызванные вращательными колебаниями его внутренней границы с двумя частотами относительно состояния покоя. Установлено, что увеличение амплитуды колебаний границы на большей из частот может приводить к существенному усилению низкочастотной моды в течении вблизи внешней границы. При этом изменяется волновая структура течения: в области, граничащей с внешней сферой, направление распространения волны меняется с радиального на меридиональное. Рассматриваемое явление представляет собой передачу энергии от высокочастотных колебаний скорости с большей амплитудой к низкочастотной моде с меньшей амплитудой. Обмен энергией между модами происходит с участием меридиональной циркуляции, нестационарное течение при этом остается устойчивым. Превышение амплитуды низкочастотной моды над амплитудой высокочастотной моды возрастает с уменьшением низкой частоты и существенно зависит от меридионального угла, увеличиваясь на два порядка по мере удаления от экватора к полюсу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова

НИИ механики МГУ, Москва

Экспериментально исследованы изотермические турбулентные течения вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое. Рассматривается воздействие модуляции скорости вращения внутренней сферы на свойства турбулентности. Проведены измерения скорости течения лазерным доплеровским анемометром. Обнаружен локальный минимум в зависимости величины турбулентных пульсаций от амплитуды модуляции. Установлено, что в отсутствие модуляции наклоны спектров скорости близки к величине -11/5. С увеличением амплитуды модуляции возможно формирование спектров, характерных для двумерной турбулентности: с наклоном -5/3 на низких частотах и наклоном -3 на высоких частотах. Показано, что модуляция скорости вращения может приводить к снижению уровня турбулентных пульсаций скорости, и этот уровень в случае двумерной турбулентности ниже, чем в случае трехмерной. Переход от трехмерной турбулентности к двумерной под действием модуляции возможен в случае высокого уровня синхронизации.

ВЛИЯНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.В. Жуков

НИИ механики МГУ, Москва

В последние годы были созданы намагничивающиеся поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые позволяют управлять движением границ раздела обычных жидкостей путем воздействия магнитных полей с индукцией порядка 1 Тл. Для таких сред характерны существенная анизотропия и зависимость поверхностного натяжения от напряженности магнитного поля.

Для определения зависимости поверхностного натяжения от напряженности магнитного поля построена модель структуры межфазной поверхности на границе раздела обычных несжимаемых жидкостей в присутствии намагничивающегося ПАВ. Структура границы раздела определялась путем численной минимизации полной свободной энергии системы в магнитном поле. Вблизи границы раздела система рассматривалась как трехкомпонентная среда, объемная плотность свободной энергии которой зависит от напряженности магнитного поля, концентрации поверхностно-активного вещества, плотностей контактирующих жидкостей и их градиентов. Тензор поверхностных натяжений и другие поверхностные характеристики определялись как избыточные (по Гиббсу) значения для соответствующих объемных плотностей. Найдено выражение для тензора поверхностных натяжений как функции от напряженности магнитного поля и поверхностной концентрации ПАВ.

Решение задачи о структуре границы раздела показывает, что концентрация ПАВ резко возрастает внутри межфазного слоя. На границе раздела присутствует поверхностная фаза ПАВ с отличной от нуля поверхностной намагниченностью,

пропорциональной поверхностной концентрации ПАВ. При этом для устойчивых состояний среды поверхностная фаза является парамагнитной в касательном и диамагнитной в нормальном направлении к поверхности.

В рамках построенной модели рассмотрена задача о распространении капиллярно-гравитационных волн малой амплитуды на горизонтальной свободной поверхности вязкой жидкости в присутствии намагничивающегося ПАВ во внешнем магнитном поле. Получено дисперсионное уравнение, связывающее волновые векторы и частоты поверхностных волн. Найдено приближенное аналитическое решение этого уравнения для случая длинных волн. Для этого решения при каждом значении волнового вектора напряженности магнитного и гравитационного полей определяют характерную частоту, а вязкость и параметр взаимодействия ПАВ – декремент затухания волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00157; 17-01-00037).

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ

С.А. Жуков, Е.В. Колдоба

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В нефти и газовом конденсате содержатся сотни компонент, причем присутствие даже небольших концентрации одного из них может изменить фазовое состояние смеси. Расчет фазовых диаграмм многокомпонентных углеводородных растворов в композиционной модели (flash) требует огромных численных затрат времени, к тому же расчет может войти в неустойчивую область, перескочить на другую не физическую ветвь решения. Для того чтобы это не произошло, необходимо использовать более точные начальные приближения K-values.

В работе получены новые аналитические формулы для констант фазового равновесия (K-values). Развитый теоретический подход учитывает влияние температуры, давления и состава реальных углеводородных растворов. Предложены простые модельные уравнения состояния и модельный потенциал Гиббса, которые хорошо описывают фазовое поведение многокомпонентных растворов в некотором практически важном диапазоне давлений и температур. Модель содержит легко вычисляемые параметры, после чего нет необходимости настраивать модель. Подход позволяет построить термодинамически согласованную модель, удобную для численного моделирования двухфазной многокомпонентной фильтрации: сокращаются требуемые вычислительные ресурсы, повышается надежность расчетов.

О КРИТЕРИИ ПОЭТАПНОГО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ НАГРУЖЕНИЯ

Э.Б. Завойчинская

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В проблеме оценки долговечности продуктопроводов, сосудов давления и других конструкций существует необходимость описания процессов разрушения металлов и сплавов при полигармоническом нагружении. При этом возникает задача оценки

долговечности элементов конструкций по определенному уровню накопленных дефектов, т.е. построения теорий разрушения на разных масштабно-структурных уровнях.

В докладе обсуждаются определяющие соотношения предложенной теории поэтапного хрупкого усталостного разрушения для полигармонического периодического одноосного процесса нагружения. Процесс разрушения рассматривается на шести масштабно-структурных уровнях на основе анализа физических закономерностей стадийного процесса образования, развития и слияния дефектов каждого уровня, полученных в физике твердого тела, материаловедении, механики деформируемого твердого тела для представительного ряда углеродистых, легированных, нержавеющих, коррозионно-стойких, аустенитно-мартенситных сталей; черных и цветных металлов; чугунов; никелевых, алюминиевых, титановых сплавов при многоцикловом и гигацикловом нагружениях. Определяется усредняющая функция данного уровня, которая отражает процесс разрушения, и вводится понятие вероятности разрушения по дефектам данного уровня как вероятности достижения усредняющей функцией предельного значения (дефектами соответствующего уровня – предельного состояния). Предлагается система рекуррентных определяющих соотношений для вероятности разрушения на каждом уровне, описывающая процесс развития хрупкого разрушения в виде ограниченного числа шагов до макроусталостного разрушения с выходом на кривую усталости по дефектам мезоуровня и образованию единичной макротрещины. При этом особенностью построения этих соотношений является то, что в качестве переменной выбирается амплитуда нагружения при основной частоте, а материальные функции определяются по данным стандартных усталостных одночастотных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин и учитывают отношения других амплитуд, частот и разности фаз в соответствии с известными экспериментальными данными зависимости пределов усталости и циклических пределов текучести от частоты нагружения и критериями усталостной прочности металлов. По модели определяется начало роста дефектов каждого уровня, временной диапазон разрушения на микроуровне, кривая усталости и долговечность металла по дефектам мезоуровня. В качестве примера расчета по модели обсуждаются результаты по двухчастотному нагружению углеродистой стали. Найдены материальные функции модели и области развития дефектов каждого уровня в зависимости от отношения между амплитудами напряжений. Построены зависимости между амплитудами при различных числах циклов до разрушения по дефектам мезоуровня, которые хорошо согласуются с известными экспериментальными данными для стали.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ И УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ ТРУБОК

Ю.С. Зайко [1], *В.В. Веденеев* [2], *А.Д. Сударикова* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Устойчивость и колебания упругих трубок при протекании внутри них жидкости изучаются на протяжении нескольких десятилетий экспериментально, аналитически и численно в контексте моделирования течений различных биожидкостей. Большинство экспериментов 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. Экспериментальная установка выполнена по схеме резистора Старлинга. В качестве рабочих жидкостей используются растворы глицерина в воде различной концентрации и, следовательно, различной вязкости, что обеспечивает ламинарный или турбулентный режим в диапазоне расходов 1-9 л/мин в тонкостенной латексной трубке диаметром 8 мм. Длина трубки в экспериментах варьируется от 30 до 50 см и не влияет на поведение трубки.

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 следующий. При небольшом перепаде давления трубка схлопывается последовательно два раза, затем следует более длинная пауза. При повышении перепада давления число последовательных схлопываний с большей частотой растет. При определенном (зависящем от расхода) перепаде в трубке наступают одночастотные колебания. Важно отметить, что после потери устойчивости трубкой наблюдается явление, известное как «flow rate limitation», когда расход перестает расти и остается постоянным при повышении перепада давления.

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.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00004).

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ДИФФУЗОРЕ С ПРОНИЦАЕМОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, А.Д. Сударикова, С.Х. Тепловодский

НИИ механики МГУ, Москва

Проведено экспериментальное исследование воздушных затопленных струй, сформированных при помощи устройства, центральным элементом которого является диффузор с проницаемой перегородкой. Благодаря специальной технологии подготовки воздуха, полученные затопленные струи имеют удлиненный начальный ламинарный участок. Диаметр струи составляет 120 мм, длина ламинарного участка, где интенсивность турбулентности сохраняет свое начальное значение (менее 1 %), достигает 5,5 диаметров струи при числах Рейнольдса ~ 10 000.

С целью иллюстрации картины течения внутри диффузора и детального изучения профиля скорости, получающегося на выходе из формирующего устройства, проведено численное исследование течения в цилиндрической части канала и диффузоре. Полученные численно и экспериментально профили скорости на расстоянии 5 мм от выхода струи в окружающую среду согласуются хорошо. Расчет показал, что при увеличении скорости на входе в формирующее устройство возникает малый локальный ламинарный отрыв на стенке диффузора, что сопровождается появлением точки перегиба на профиле скорости; это служит причиной развития неустойчивости.

Экспериментально получена зависимость длины ламинарного участка от скорости течения. Визуализация течения выполнена с помощью лазера непрерывного излучения.

Начальные ламинарные участки таких струй могут быть использованы для детального изучения перехода к турбулентности в затопленных струях, а также для обеспечения газодинамической защиты и создания локальных чистых зон.

ЗАДАЧА О ГРАВИТАЦИОННОМ ОСАЖДЕНИИ ДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ В УЗКОМ КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Д.В. Залялутдинов [1], *А.Н. Осипцов* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается течение дисперсной смеси в вертикальном узком слоте под действием силы тяжести. При описании двухфазной среды используется подход, основанный на представлении о взаимопроникающих и взаимодействующих сплошных средах с учетом конечного объемного содержания дисперсной фазы. Для моделирования течения в узком канале рассматривается предельный случай течения дисперсной смеси с малоинерционными частицами в приближении тонкого слоя. Проведено осреднение системы уравнений смеси по толщине канала. Это позволило свести трехмерную постановку к квазидвумерной, чем значительно упрощает задачу. Для симметричного канала переменной толщины и неоднородного распределения дисперсной фазы по толщине канала сформулирована замкнутая квазидвумерная модель гравитационной конвекции суспензии в узком вертикальном слоте. Модель включает эллиптическое уравнение для распределения давления в несущей фазе и гиперболическое уравнение переноса для объемной концентрации частиц. Уравнение Пуассона рассчитывалось на прямоугольной сетке с помощью шаблона «крест», а для решения уравнения переноса использовалась TVD-схема с ограничителем потока. Для ряда примеров начального распределения концентрации частиц проведено численное моделирование, исследована картина осаждения дисперсной смеси в узком канале. Разработанная модель может быть полезна для исследования процесса закачки и осаждения проппанта в трещинах гидроразрыва.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00057).

ОПТИМИЗАЦИЯ ЦЕНЫ ПРОДУКТА, РАСПРОСТРАНЕННОГО СРЕДИ РАЗНЫХ СЛОЕВ НАСЕЛЕНИЯ

М.П. Заплетин, П.А. Кириллова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается рынок, состоящий из двух слоев населения – высокодоходного и низкодоходного. Имеется фирма, которая производит продукт длительного пользования, приобрести который можно единожды.

Предлагается модель продукта длительного пользования (прочного продукта), где условная вероятность того, что клиент купил продукт в момент времени t, учитывая, что он не покупал продукт ранее, зависит от цены продукта, преобладающей в момент времени t. Считаем, что спрос является линейной функцией от цены. Доля

высокодоходного населения $F_1(t)$, купившая продукт, уменьшается при увеличении доли низкодоходного населения $F_2(t)$, купившей этот продукт, но при увеличении доли $F_1(t)$ доля $F_2(t)$ остается постоянной.

Стратегия фирмы – получить максимальную прибыль от продажи этого продукта. Задача формулируется как задача оптимального управления ценой продукта для максимизации прибыли фирмы с учетом динамики рынка.

Поставленная задача оптимального управления решается на основе принципа максимума Понтрягина. Рассматриваются случаи, когда продажа продукта нацелена только на высокодоходное население, когда продукт может продаваться сразу обоим слоям населения, и третий случай, в котором продукт сначала продается высокодоходной группе, затем цена снижается, и низкодоходная группа также получает возможность приобретать продукт.

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ АЛГОРИТМА НАСТРОЙКИ ИНТЕРФЕЙСА СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕННОГО УРОВНЯ ДОСТУПА

М.П. Заплетин, А.В. Лескин, О.В. Попов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Предложено описание алгоритма и процедуры настройки интерфейса системы с учетом предпочтений пользователей определенного уровня доступа, включая автоматизированные рабочие места администратора, руководителя, диспетчера, конструктора, эксперта, заказчика и др.

ПО должно обеспечивать возможность выполнения перечисленных ниже функций:

· задания параметров регистрации и авторизации;

· процедуры передачи прав для авторизации;

· алгоритма формирования прав доступа;

· реализации пользовательского интерфейса «внешнего» пользователя (заказчика предприятия);

· возможности настройки прав доступа по шаблонам, без привязки к конкретному объекту.

Описание используемых форматов: полей, параметров, строк, интервалов и диапазонов.

Описание алгоритма передачи ключа разработчику для авторизации вновь подключенного программного продукта в системе.

Особенности формирования прав доступа для каждого из АРМ и задач АРМ. Перечислены права доступа для них, типы отношений и разрешений конфликтов.

ПО «Программный комплекс АРМ специалиста (лица, принимающего решения)» должно обеспечивать:

· совместное функционирование в едином времени всех подсистем АСПИ, пунктов управления и объектов контроля с синхронизацией данных, отображаемых на автоматизированных рабочих местах (АРМ) операторов (диспетчеров);

· согласованное информационное обеспечение задач и функций, выполняемых в процессе эксперимента;

· передачу служебной (текстовой, формализованной и графической) информации и информации от подключенных к аппаратуре системы датчиков на операторские и диспетчерские пункты по соответствующему каналу связи;

· отображение информации на мониторах АРМ;

· ведение базы данных контроля обстановки и команд управления, передаваемых в формализованном, текстовом и звуковом виде.

Перечислены рекомендации для облегчения работы разработчику модуля и общая информация для разработчика о предоставлении прав доступа, структуре таблиц, параметрах задач и т.д.

О ПРОБЛЕМАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ С БАЗАМИ ДАННЫХ

М.П. Заплетин, А.В. Лескин, О.В. Попов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Разработана автоматизированная система, моделирующая работу полигона. ПО согласования межмодульного информационного обмена и совместного использования данных является составной частью АС и предназначено для управления и синхронизации работы внешних модулей с учетом их взаимодействия с базой данных.

ПО должно обеспечивать возможность выполнения перечисленных ниже функций:

· регистрации нового модуля;

· задания параметров регистрации и авторизации;

· процедуры передачи прав для авторизации;

· алгоритма формирования прав доступа;

· алгоритма формирования приоритетов при постановки задач для внешних модулей;

· процедуры работы внешних модулей с файловыми контейнерами.

ПО синхронизации баз данных компьютерной системы является составной частью АС и предназначено для управления и синхронизации работы внешних модулей с учетом их взаимодействия с базой данных.

ПО обеспечивает возможность выполнения перечисленных ниже функций:

· совместного функционирования в едином времени всех подсистем АСПИ, пунктов управления и объектов контроля с синхронизацией данных, отображаемых на автоматизированных рабочих местах (АРМ) операторов (диспетчеров);

· согласованного информационного обеспечения задач и функций, выполняемых в процессе эксперимента.

ПО управления приоритетами и уровнями доступа к базам данных и подсистемам АСПИ является составной частью АС и предназначено для управления и синхронизации работы внешних модулей с учетом их взаимодействия с базой данных.

ПО должно обеспечивать возможность выполнения перечисленных ниже функций:

· регистрации нового модуля;

· задания параметров регистрации и авторизации;

· процедуры передачи прав для авторизации;

· алгоритма формирования прав доступа;

· алгоритма формирования приоритетов при постановки задач для внешних модулей;

· процедуры работы внешних модулей с файловыми контейнерами.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ С ПОДВИЖНОГО НОСИТЕЛЯ

М.П. Заплетин [1,2], *А.В. Лескин* [1], О.*В. Попов* [1], *П.О. Попов* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ, Москва

Разработана статистико-вероятностная математическая модель, которая позволяет оценить показатели точности определения координат.

Движение носителя как твердого тела можно разделить на перемещение его центра масс и колебание относительно центра масс. Перемещение центра масс определяется двумя движениями – основным движением носителя вооружения под действием движителей и колебательным движением центра масс под действием возмущающих сил.

Для построения вероятностно-статистической модели выбрано гауссовское (нормальное) распределение, как наиболее полно соответствующее физическим и химическим процессам, которые изучают современные естественные науки.

В предлагаемом программном обеспечении дана возможность работы с шумами (отклонениями) по нормальному распределению с нулевым средним значением для избранных параметров (скорость, вертикальный угол вылета, горизонтальный угол вылета). Приведены описания тестовых исследований программного обеспечения:

· на надежность и отказоустойчивость;

· на защиту от внешних воздействий и неправильных действий оператора;

· на последствия перезагрузки и скорость расчета;

· на совместимость с другой используемой на практике аппаратурой;

· на корреляцию результатов с расчетами по аналогичным программным продуктам;

· на возможность использования для коррекции работы оборудования на основе предсказательного моделирования.

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СКЛАДИРОВАНИЯ

М.П. Заплетин, Г.М. Хамматова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Многие промышленные предприятия используют систему производственного складирования, чтобы управлять колебаниями в потребительском спросе на их продукт. Склад играет немаловажную роль в технологической цепи любого предприятия. Основное назначение склада – концентрация запасов, их хранение и обеспечение бесперебойного выполнения заказов потребителей. Чем лучше продуман подход к работе с запасами, тем более динамично проходят операции с товарами, что делает предприятие более конкурентоспособным, привлекательным для клиентов и создает фирме хорошую репутацию. Размер запасов должен быть достаточным для обеспечения непрерывности процесса товарного обращения, в то же время превышение количества товара, необходимого для удовлетворения спроса, может вести к дополнительным издержкам, связанным с хранением запасов на складе. К таким издержкам относятся, например, затраты на содержание складов, страхование продукта, зарплата обслуживающего персонала и т.д. Исходя из этого, предприятия могут определять оптимальный объем

запасов – количество товара, необходимое для обеспечения бесперебойного торгового процесса, при котором стоимость хранения единицы товара является минимальной.

Одним из подходов к исследованию систем производственного складирования является математическое моделирование систем, приводящее к задаче оптимального управления. Для решения подобных задач применяется принцип максимум Понтрягина, который имеет прозрачную экономическую интерпретацию и является эффективным аналитическим средством.

В работе рассматривается система производственного складирования на примере предприятия, которое производит единственный продукт. Часть произведенного товара предприятие продает покупателю, оставшийся товар отгружается на склад. На складе некоторая доля товаров портится. Разрешены короткие продажи. Предприятие имеет некоторый «план» производства, который тождественно не равен действительному уровню производства. Стратегия фирмы – держать производство на уровне, максимально близком к желаемому, а также хранить на складе объем товара, максимально близкий к оптимальному объему запасов.

В задаче минимизируется функционал невязок, который описывает отклонение действительного уровня производства товаров и уровня запасов на складе от желаемых. В качестве управления выступает функция цели производства. На управление наложены ограничения.

Для исследования задачи применяется принцип максимума Понтрягина. Выписаны необходимые условия оптимальности, проведен их анализ. Найдено решение в явном виде для различных участков управления, показано, что анормальный случай невозможен. Рассмотрены примеры, иллюстрирующие полученные результаты.

АНАЛИЗ ПАНЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

М.П. Заплетин, А.В. Хапкин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Метод опорных векторов (англ. SVM, support vector machine) – набор алгоритмов обучения с учителем, использующихся для задач классификации и регрессии в машинном обучении. Этот алгоритм принадлежит к семейству линейных классификаторов. На данный момент является одним из наиболее популярных алгоритмов в машинном обучении ввиду его обобщающей способности и простого использования в нейронных сетях в качестве отдельных слоев.

Основная идея метода состоит в переводе исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиске наиболее оптимальной разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в новом пространстве. Берутся две параллельные гиперплоскости, которые строятся по обеим сторонам гиперплоскости, которая разделяет эти классы. А разделяющей гиперплоскостью будет гиперплоскость, которая максимизирует расстояние до этих двух параллельных плоскостей. Алгоритм работает в предположении, что чем больше разница или расстояние между этими гиперплоскостями, тем меньше будет ошибаться классификатор. Именно этот переход в пространство с более высокой размерностью решает проблему линейной неразделимости классов, которая не решается другими линейными классификаторами.

В работе рассматривается обобщение метода опорных векторов для работы с панельными данными. Имеются объекты, которые имеют определенные характеристики, меняющиеся с течением времени, и у каждого объекта в каждый момент времени имеются

метки, которые появляются с некоторой задержкой по сравнению с характеристиками. Требуется предсказать значение меток для последнего периода времени, когда известны только характеристики объектов и вся прошлая информация (характеристики и метки). Например, можно взять несколько заводов, у которых в конце каждого месяца подводятся итоги – сколько товара произвел завод, расходы на производство, расходы на логистику, прибыль и так далее, а в качестве меток можно взять следующее – выйдет ли завод на положительную прибыль в следующем месяце. Задача состоит в предсказании этих меток для последнего момента времени.

Основная идея обобщения метода для работы с панельными данными состоит в добавлении к функционалу, который минимизируется, специальной последовательности слагаемых, которая называется регуляризацией по времени, в дополнение к обычной регуляризации по Тихонову для борьбы с переобучением. Полученный функционал выписан в явной форме, проведен анализ нахождения его минимума, изучена асимптотика алгоритма. Также проведен эксперимент алгоритма на реальных данных от ОАО «Сбербанк», в котором сравниваются результаты обычного SVM-алгоритма и его обобщения в рамках одной задачи предсказания.

ЗАДАЧА О БРАХИСТОХРОНЕ В СРЕДЕ С СОПРОТИВЛЕНИЕМ

А.В. Зароднюк [1], *О.Ю. Черкасов* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается движение тяжелой точки в однородной среде и в однородном поле силы тяжести. Проводится качественный анализ задачи максимизации горизонтальной дальности за фиксированное время, которая, в предположении монотонной зависимости дальности движения от времени, является двойственной к модифицированной задаче о брахистохроне. Отличие модифицированной задачи быстродействия от классической состоит в замене конечной точки прихода на вертикальную прямую.

Настоящая работа посвящена исследованию знака нормальной составляющей реакции опорной кривой, вдоль которой происходит движение материальной точки, для задачи максимизации в среде с сопротивлением, пропорциональным некоторой неотрицательной действительной степени скорости. Суть исследования состоит в выявлении зависимости знака реакции от начальных условий и параметров системы.

Анализ знака реакции проводился в численном и качественном виде в различных работах, в которых решались задачи в близких постановках при действии лишь силы сухого трения. В настоящей же постановке подобных исследований еще не проводилось. Это может быть связано с тем, что во многих работах приводились лишь результаты численных расчетов экстремальных траекторий, которые были выпуклы вниз. Однако в последних исследованиях было установлено, что при некоторых начальных условиях и параметрах системы траектории движения могут менять выпуклость, а так же иметь квазипрямолинейный участок, что косвенным образом указывает на возможность изменения и знака реакции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-31-00204).

ПОЛЯРНО-СИММЕТРИЧНАЯ СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА МЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ ОРТОТРОПНОГО ЦИЛИНДРА

Н.А. Зверев [1], *А.В. Земсков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В рамках существующих подходов к моделированию связанных полей различной физической природы рассматривается полярно-симметричная стационарная задача механодиффузии для однородного ортотропного сплошного цилиндра. Математическая постановка задачи представляет собой связанную систему уравнений равновесия и баланса массы. На поверхности цилиндра задаются перемещения и приращения концентрации. При этом искомые величины считаются ограниченными внутри рассматриваемой области.

Заданная математической постановкой система обыкновенных дифференциальных уравнений представляет собой систему уравнений Эйлера с переменными коэффициентами. Решение ищется с помощью степенной постановки, приводящей исходную однородную систему дифференциальных уравнений к однородной системе линейных алгебраических уравнений. Решив характеристическое уравнение этой системы, строится фундаментальная система решений и находится общее решение исходной системы дифференциальных уравнений. Постоянные интегрирования определяются из граничных условий. По найденным перемещениям и концентрациям вычисляются компоненты тензоров деформаций и перемещений.

Выполнен тестовый расчет для сплошного цилиндра из алюминия. Результаты вычислений представлены в аналитической и графической формах. Необходимые численные расчеты сделаны в пакете Maple 2016.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00663).

РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ В СЛУЧАЕ ВЫРОЖДЕНИЯ ТИПА УРАВНЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ

А.В. Звягин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В работе рассматриваются примеры краевых задач, для которых тип уравнений меняется в граничных точках. Показано, что в этом случае невозможна постановка классических граничных условий, поскольку задача может оказаться переопределенной. Данная особенность уравнений характерна для задач, в которых тип уравнений зависит от внешних силовых полей, в которых движется тело. В качестве примера такого рода задач рассмотрена проблема колебаний подвешенной тяжелой нити. В этом случае граничное условие заменяется условием ограниченности решения. Показано, что в рассматриваемых примерах такое интересное с точки зрения приложений явление, как резонанс, также имеет существенные отличия от классической трактовки. Особенности поведения деформируемых тел в задачах рассматриваемого типа могут найти приложения в реальных механизмах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В КОМБИНИРОВАННОМ РАСХОДНОМ СОПЛЕ

А.Г. Здитовец, Ю.А. Виноградов, Н.А. Киселев, М.М. Стронгин, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ, Москва

В работе представлены результаты экспериментального исследования эффекта энергоразделения воздушного потока при прохождении его через комбинированный канал, состоящий из проницаемой цилиндрической трубки, с предвключенным звуковым/трансзвуковым соплом.

В основе энергоразделения лежит известный газодинамический эффект – искривление профиля температуры торможения при обтекании сжимаемым газовым потоком твердой поверхности. Он вызван дисбалансом между процессами выделения тепла в результате вязкой диссипации и отвода тепла теплопроводностью из пристенных областей. В зависимости от значения молекулярного числа Прандтля (Pr) газового потока, которое может быть меньше, равно или больше единицы, температура торможения пристенных слоев будет меньше, равна или больше начальной температуры торможения, соответственно. Для воздуха $\mathrm{Pr} = 0,72$. Следовательно, если организовать отсос пристенных «охлажденных» слоев, то среднемассовая температура оставшегося потока возрастет.

Исследования проводились на экспериментальном участке, созданном в НИИ механики МГУ, который состоял из форкамеры, комбинированного канала (сопло с проницаемой трубкой) и ресивера, свободно сообщающегося с атмосферой. В форкамере фиксировались начальные параметры потока (полное давление P_0^* и температура торможения T_0^*). Тепловизором фиксировалась температура поверхности проницаемого участка. Хромель-алюмелевой термопарой, расположенной в специальном зонде, измерялась температура торможения потока в ресивере. По длине проницаемого участка располагалось 15 приемников статического давления, на срезе сопла – 1.

Увеличение полного давления P_0^* потока в форкамере приводило к соответствующему росту статического давления P_{st} на срезе сопла (на входе в проницаемый канал). При этом, в зависимости от профиля сопла, поток на входе в проницаемый канал достигает звуковой или трансзвуковой скорости.

Начиная с некоторых значений P_0^*, на всей длине проницаемого канала реализовалось течение с отсосом, об этом свидетельствуют измерения профиля статического давления по длине проницаемого канала. При этом если скорость потока на входе в него была звуковой или трансзвуковой, то возможно дальнейшее ускорение потока внутри проницаемого канала за счет расходного воздействия.

Температурные измерения показывали снижение температуры поверхности проницаемой стенки по сравнению с начальной температурой торможения в форкамере, которая поддерживалась равной температуре окружающей среды. Таким образом, через проницаемые стенки воздух выходил с температурой меньшей начальной, а в ресивере – на выходе из проницаемого канала – температура воздуха становилась выше начальной, т.е. происходило безмашинное энергоразделения потока. При этом с увеличением полного давления разность температур на выходе из проницаемого канала и на входе в него (T_0^*) выходила на некоторую предельную величину.

В работе приводится подробное экспериментальное исследования данного эффекта. На основе одномерных уравнений термодинамики газового потока обосновываются возможные режимы течения внутри проницаемого элемента. Рассматриваются способы повышения эффекта энергоразделения газа как за счет использования более эффективного рабочего тела (газы с низким числом Прандтля), так и за счет геометрических характеристик устройства.

НЕЛИНЕЙНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ НАПОЛНЕННОГО ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Ю.П. Зезин [1], *Р.М. Изимов* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

В настоящее время полимерные композиты являются основным классом реставрационного материала в стоматологии. Основные преимущества композитов по сравнению с другими материалами являются – высокая прочность, технологичность, низкая усадка при полимеризации, высокие и гибкие эстетические характеристики. В качестве полимерной матрицы в подобных композитах часто используют полиметилметакрилат – прозрачный, синтетический полимер, один из видов полимеров эфира метакриловой кислоты. В качестве наполнителей, придающих полимерным композитам дополнительную жесткость и прочность, в стоматологических композитах широко используют мелкодисперсные порошки кремнезема, кварца, стекла, силикатов, оксидов и солей металлов. Существенным недостатком полимерных композитов является вязкоупругий характер их деформирования под действием механических нагрузок. Вязкоупругость полимеров обусловлена особенностями их молекулярного строения. Введение в состав композитов жестких частиц наполнителя не только не подавляет зависимость механических характеристик полимерного материала, но и добавляет дополнительные структурные механизмы зависимости свойств материла от времени, связанные с адгезионным взаимодействием между матрицей и частицам наполнителя. В связи с множественностью механизмов вязкоупругого деформирования полимерных композитов актуальной задачей становится экспериментальное исследование их механических свойств в условиях, приближенных к условиям использования этих материалов. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования композиционного материала на основе полиметилметакрилата, наполненного мелкодисперсным порошком гипса. Степень наполнения композита составляла 30 % по массе. Проведены испытания образцов композита на ползучесть при сжатии в широком диапазоне значений нагрузки. Показано, что для исследуемого материала характерна нелинейность вязкоупругого поведения – податливость композита при ползучести существенно зависит от величины приложенного напряжения. Для описания полученных экспериментальных данных использовано определяющее соотношение нелинейной теории вязкоупругости. Параметры принятого определяющего соотношения определены по экспериментальным кривым ползучести материала. Показано, что предлагаемый подход позволяет описать ступенчатую ползучесть исследуемого композита, при которой периоды роста деформации сменяются периодами обратной ползучести.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-03604).

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Ю.П. Зезин [1], *С.И. Соколов* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Эластомерные композиты представляют широкий класс конструкционных и функциональных материалов различного назначения. Необходимые механические свойства композитов достигаются как за счет оптимального выбора эластомерного связующего, так и подбором системы дисперсных наполнителей. Прогнозирование механических характеристик при разработке подобных многофазных систем представляет важную научную проблему, которая в настоящее время изучена недостаточно. В этой связи становится актуальным экспериментальное исследование механических свойств эластомерных композитов и разработка методов феноменологического описания их поведения при различных внешних воздействиях, моделирующих условия эксплуатации. Как правило, эластомеры, использующиеся в качестве связующего в подобных композитах, не проявляют зависимости механических свойств от времени. Наиболее часто использующиеся наполнители для исследуемых композитов – это жесткие материалы, практически не деформирующиеся при нагрузках, характерных для деформирования эластомеров, и не проявляющие зависимость механических характеристик от времени. Тем не менее существенной особенностью эластомерных композитов является вязкоупругий характер их механического поведения. В предлагаемой работе представлены результаты экспериментального исследования вязкоупругих свойств модельного эластомерного композита на основе синтетического каучука. Наполнителем в исследуемом материале является смесь дисперсных порошков окисей кальция и магния. Содержание наполнителя в материале составляет около 75 % по объему. Испытания образцов материала при растяжении проведены в режимах ползучести и релаксации напряжения. Испытания материала на ползучесть проведены при нагружении образцов естественным грузом. Измерение деформаций в процессе ползучести материала осуществлялось по оценкам относительного перемещения с использованием дифференциально-трансформаторного датчика перемещений. Испытания на релаксацию напряжений проведены с использованием специальной установки, позволяющей задавать необходимую деформацию со скоростью порядка $1\ с^{-1}$. Для описания вязкоупругого поведения исследуемого материала приняты нелинейные определяющие соотношения теории вязкоупругости. Экспериментальные кривые релаксации использованы для определения ядра релаксации, постоянных и функции нелинейности, входящие в определяющие уравнения. Для описания кривых ползучести материала использована резольвента ядра релаксации. Предложен приближенный метод расчета деформации при постоянном уровне напряжений. Показано, что принятые определяющие соотношения позволяют с удовлетворительной точностью описать ползучесть и релаксацию исследуемого композита при одноосном растяжении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-03604).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

Ю.П. Зезин [1], *П.В. Тишин* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Полимерные материалы широко используются для производства различных профилей, в том числе труб и колец. Механические характеристики полимеров в готовом изделии существенно зависят от способа и параметров режима переработки. В связи с этим механические свойства материалов труб и колец целесообразно определять по результатам испытаний представительных кольцевых образцов. При этом учитывается как особая форма испытываемых изделий, так и специфика методов их получения. Известна схема нагружения образцов-колец внутренним давлением, которое задается в процессе сжатия вкладки из несжимаемого материала в полости испытуемого образца. При этом в образце реализуется напряженное состояние, близкое к однородному растяжению. В данной работе представлены результаты численного анализа такой схемы испытаний полимерных материалов при постоянной нагрузке. Конечно-элементная модель схемы нагружения разработана с использованием коммерческого программного комплекса ANSYS. Вычисления выполнены для образцов-колец полиарилата. Получены расчетные распределения напряжений в образце при постоянной нагрузке. Исследовано влияние модуля упругости и коэффициента Пуассона нагружающего вкладыша на величину растягивающих напряжений в образце. Результаты численного моделирования использованы для оценки долговечности уплотняющих колец полиарилата, полученных литьем под давлением при различных значениях температуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-03604).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАСШТАБИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ИАС «ИСТИНА»

А.А. Зензинов

НИИ механики МГУ, Москва

Развитие и распространение информационных систем, как правило, сопровождается увеличением сложности их архитектуры и повышением требований к используемым ресурсам и программному обеспечению. Моделирование таких систем является необходимым этапом в исследованиях возможных направлений развития системы.

Перед разработчиками ИАС «ИСТИНА» (далее для краткости – Системы) на сегодняшний день стоят задачи по ее масштабированию, вызванные появлением новых научных организаций, внедряющих использование Системы в рамках пилотного проекта, что ведет за собой появление географически распределенных кластеров пользователей. В этой связи необходимо принимать решения по развитию инфраструктуры с учетом новых требований к доступности Системы, вызванных увеличением числа пользователей и их географическим положением.

Удаленность пользователей от Системы характеризуется увеличенными задержками при передаче данных по сети по сравнению с использованием Системы в МГУ имени М.В.Ломоносова.

Рассматривается три варианта масштабирования Системы на новые организации:

· режим «облака», при котором веб-сервера и базы данных работают в едином центре обработки данных (ЦОД);

· веб-сервера располагаются в организациях, базы данных расположены в едином ЦОД;

· веб-сервера и базы данных располагаются в нескольких распределенных ЦОД.

Использование гибридного подхода к моделированию – сочетания имитационного, натурного, аналитического и виртуального моделирования – позволяет изучать поведение моделируемой распределенной системы в различных конфигурациях с учетом особенностей программного обеспечения, различных сетевых сред.

В экспериментальных исследованиях исследовалась зависимость времени загрузки веб-страниц Системы от времени задержки при передаче сетевых пакетов на участке сети между веб-сервером и базой данных. Моделировалось поведение 24 пользователей, осуществляющих следующую последовательность действий: вход в Систему; открытие страницы диссертационного совета, которая характеризуется большим количеством передаваемых запросов от веб-сервера к базе данных; выход из Системы. Результаты проведенных экспериментов показали, что время загрузки веб-страниц в проведенном сценарии изменяется линейно с ростом величины задержки до того момента, когда веб-сервер возвращает ошибку по превышению допустимого времени загрузки. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что сетевой участок между веб-сервером и базой данных чувствителен к задержкам в передаче данных и реализация второго из перечисленных вариантов масштабирования Системы не рекомендуется.

ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ Я.В. ТАТАРИНОВА В ДИНАМИКЕ ЭКИПАЖА С ОМНИ-КОЛЕСАМИ С УЧЕТОМ МАССИВНОСТИ РОЛИКА

А.А. Зобова, Г.Н. Моисеев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается динамика мобильного экипажа, движущегося по инерции по неподвижной абсолютно шероховатой плоскости. Экипаж состоит из горизонтальной платформы и трех вертикальных омни-колес, которые вращаются независимо друг от друга, их плоскости неподвижны относительно платформы и вертикальны. Два колеса параллельны друг другу, а их оси совпадают (задние колеса), а плоскость переднего колеса перпендикулярна задним.

Омни-колесо представляет собой колесо, на ободе которого установлены свободно вращающиеся ролики, так что оно может двигаться как обычное колесо, перекатываясь с ролика на ролик, а может двигаться перпендикулярно своей плоскости. В первых работах по динамике омни-экипажей (А.А. Зобова, Я.В. Татаринов, Ю.Г. Мартыненко, А.М. Формальский) была предложена следующая простейшая модель омни-колеса как абсолютно твердого диска, который катится без проскальзывания в своей плоскости и скользит без трения в направлении, перпендикулярном колесу. Динамика роликов в этой модели не учитывается. Ранее была исследована устойчивость прямолинейных движений экипажа. В данной работе для исследования влияния инерции ролика на устойчивость прямолинейных движений экипажа переднее колесо моделируется как два твердых тела – диск колеса и опорный ролик. На невозмущенном прямолинейном движении диск

переднего колеса двигается поступательно, а опорный ролик вращается вокруг горизонтальной оси. При малых отклонениях от возмущенного движения переднее колесо будет опираться на тот же ролик, а динамикой неопорных роликов можно пренебречь. Для указанной модели составлены динамические уравнения в форме лаконичных уравнений Я.В. Татаринова, показана их связь с динамическими уравнениями, полученными для простейшей модели омни-колеса, и исследована устойчивость прямолинейных движений в линейном приближении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00338).

ДИНАМИКА ЭКИПАЖА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ НА ПЛОСКОСТИ С ТРЕНИЕМ

А.А. Зобова, Е.Б. Подкользина

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается динамика двухколесного экипажа на неподвижной горизонтальной плоскости. Предполагается, что колеса имеют общую ось, но могут вращаться независимо друг от друга, причем плоскости колес относительно платформы экипажа неподвижны (дифференциальный привод). В точках контакта колес с плоскостью возможно проскальзывание, при этом возникает сила трения.

Составлены динамические уравнения для произвольной модели трения с учетом управляющих моментов в осях колес. Для модели вязкого трения и при отсутствии управлений найдено инвариантное множество системы – совокупность прямолинейных движений экипажа с одинаковой угловой скоростью колес. На инвариантном множестве найдено общее решение динамических уравнений. Исследуется устойчивость стационарных движений экипажа и инвариантного множества.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00338).

О ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХОДНОЙ ГАМИЛЬТОНОВОЙ СИСТЕМЫ С НЕКОМПАКТНЫМ КОНФИГУРАЦИОННЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

О.Э. Зубелевич

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается натуральная гамильтонова система, конфигурационным пространством которой является двумерный цилиндр. Потенциальная энергия системы не имеет локальных минимумов. Доказывается существование периодических решений, делающих по крайней мере один полный оборот вокруг оси цилиндра. Доказательство проводится с использованием вариационных методов, развитых в теории эллиптических уравнений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-03747).

РОМБОВИДНОЕ КРЫЛО В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

М.А. Зубин, Ф.А. Максимов, Н.А. Остапенко

НИИ механики МГУ, Москва

Приведены результаты численного исследования несимметричного обтекания ромбовидного крыла с углами раскрытия $\gamma = 240°$ и при вершине консолей $\beta = 45°$ на режимах со сверхзвуковыми передними кромками при числах Маха $M = 3\text{-}6$.

Обнаружены неизвестные ранее разнообразные схемы течения в ударном слое в зависимости от числа Маха, углов атаки и скольжения, обусловленные наличием точки излома поперечного контура крыла. При обтекании со скольжением на режимах с дозвуковым (поперечным) течением в окрестности центральной хорды крыла наблюдается срыв потока с наветренной консоли с образованием вихря на подветренной консоли. Увеличение угла скольжения приводит к возникновению транс- и сверхзвукового течения по обводу вихря и в возвратном потоке около стенки подветренной консоли с образованием ударных волн. При умеренных числах Маха невозмущенного потока с ростом угла скольжения характерно сближение точки присоединения (растекания) линии тока, замыкающей вихрь, и узла линий тока на поверхности подветренной консоли. Когда в окрестности точки излома контура реализуются условия, допускающие существование центрированной волны разрежения, вихрь сдвигается вниз от точки излома контура вдоль поверхности крыла, а перед ним образуется ударная волна. После «слияния» указанных точки растекания и узла линий тока на подветренной консоли остается лишь точка стекания, в которую входят линии тока, идущие от передних кромок крыла, и вихревая особенность Ферри над ней.

В экспериментах при числе $M = 3$ с использованием различных методов, в частности – специального теневого метода для визуализации конических течений, подтверждено существование схем обтекания с образованием вихря на подветренной консоли крыла в окрестности центральной хорды. В возвратном потоке внутри вихря обнаружен отрыв турбулентного пограничного слоя, который существует при дозвуковой скорости возвратного течения и исчезает при достижении ею скорости звука.

На основании известных данных [1] можно прогнозировать, что внутренний отрыв появится вновь под действием ударной волны, соответствующей интенсивности, при сверхзвуковой скорости течения в возвратном потоке.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 15-01-02361).

Литература

1. *Зубин М.А.* Свойства трансзвукового возвратного потока области отрыва турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковых конических течениях / М.А. Зубин, Н.А. Остапенко // ДАН. – 2011. – Т. 438. – № 2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВЫМ УСТУПОМ

А.Ф. Зубков, М.М. Симоненко

НИИ механики МГУ, Москва

Представлены результаты экспериментального исследования сверхзвукового обтекания осесимметричного цилиндрического тела с кольцевым уступом на поверхности под углом атаки.

Экспериментальная модель включала цилиндрический корпус диаметром 46 мм и установленный соосно с корпусом выдвижной цилиндрический стержень диаметром 30 мм. Высота кольцевого уступа между боковой поверхностью стержня и поверхностью корпуса была 8 мм. На свободном конце стержня устанавливался конический наконечник. Длина стержня (расстояние между корпусом и основанием конического наконечника) могла меняться в диапазоне 56-160 мм. Эксперименты проведены в аэродинамической трубе А-7 НИИ механики МГУ. Рабочая среда – воздух с температурой торможения 270-275 К. Полное давление потока в рабочей части трубы было $4{,}3 \times 10^5$ Па, число Маха – 3 соответственно. Единичное число Рейнольдса $3{,}7 \times 10^7$ м$^{-1}$.

Модель устанавливалась в рабочей части трубы на донной державке. После выхода трубы на рабочий режим производилось перемещение модели на заданный угол атаки, затем осуществлялось непрерывное выдвижение стержня, после чего стержень возвращался в исходное положение. В другой серии опытов при фиксированной длине стержня осуществлялось непрерывное изменение угла атаки в сторону увеличения от 0 до 15° и обратно. В ходе экспериментов осуществлялась видеорегистрация шлирен-изображений картин течения и регистрировалось давление на стенке уступа на расстоянии 3 мм от поверхности стержня.

В рассмотренных диапазонах изменения длины стержня и угла атаки выявлены режимы обтекания, когда давление на подветренной стороне превышает по величине давление на наветренной стороне уступа. При этом на теневых картинах визуализации наблюдается система последовательных косых скачков уплотнения в подветренной области перед уступом, что может быть вызвано поперечным отрывом потока. Прямые (увеличение длины стержня или угла атаки) и обратные (уменьшение длины стержня или угла атаки) кривые изменения давления практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии гистерезиса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-99623).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОДАТЛИВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТРЕНИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

О.О. Иванов, В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ, Москва

Исследование посвящено изучению одного из возможных способов снижения турбулентного сопротивления в жидкости и газах – использованию податливых вязкоупругих покрытий. Проведено исследование влияния однослойных вязкоупругих покрытий на снижение локального трения и общего сопротивления тестовой модели в гидродинамической трубе НИИ механики МГУ в диапазоне скоростей 5-16 м/с, причем

динамические характеристики вязкоупругого материала были тщательно измерены и задокументированы. 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 обнаружено, что покрытия увеличивают сопротивление, но не более чем на 6,5 %. Кроме того, проводились измерения профилей осредненной скорости в пограничном слое, из которого с помощью метода Клаузера находился коэффициент локального трения. Данный способ показал слабое (0-4 %) увеличение трения для покрытий.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

С.И. Иванов [1], *Н.А. Локтева* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В настоящее время человек обитает в достаточно агрессивной окружающей среде, где одним из вредных факторов, воздействующих на организм, является повышенный шумовой фон. В практическом плане представляет большой интерес организация эффективной звукоизоляции. Наиболее широко в данной области используются пластины, выполненные из однородного материала, которые наиболее просты в изготовлении и. экономически оправданны.

В данной работе исследуются звукопоглощающие свойства однородной консольно-закрепленной пластины Кирхгофа, которая делит акустической пространство на две четверть-среды и на которую из среды «1» действует плоская гармоническая волна. Результатом решения данной задачи является возможность построения зависимости параметра звукоизоляции от частоты набегающей волны.

Основной целью является вычисление коэффициента звукопоглощения преграды как функции частоты ω и пространственных координат x и z.

Для задания воздействия на преграду звуковой волны была определена связь амплитуд давлений с кинематическими параметрами пластины с помощью вспомогательной задачи, где рассматривалась четверть акустического пространства.

Решение задачи о взаимодействии плоской гармонической волны с консольно-закрепленной пластиной было достигнуто с учетом взаимосвязи кинематических параметров пластины и амплитуды давления набегающей волны, что в результате дает интегро-дифференциальное уравнение.

В результате полученных значений перемещений, после выполнения нескольких последовательных приближений и на основании соотношений потенциала скорости, амплитуд давлений в прошедшей и отраженной волнах можно определить коэффициент звукопоглощения и показатель звукоизоляции.

В данной работе приведен метод решения связанной задачи о взаимодействие плоской гармонической волны и консольно-закрепленной пластины. Полученные результаты зависят от материала, из которого выполнена пластина и ее геометрических параметров. Таким образом, становится возможным выбирать оптимальные параметры

материала, из которого выполнена пластина, и ее геометрию, что представляет существенный практический интерес.

АРХИВ ВИДЕОЗАПИСЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СЕМИНАРА ПО АЭРОМЕХАНИКЕ ЗА 2011-2016 ГОДЫ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА И ХРАНЕНИЯ

А.В. Инюхин

НИИ механики МГУ

В работе представлен архив видеоматериалов распределенного семинара по аэромеханике за 2011-2016 гг. Этот архив практически полностью покрывает весь период времени, когда мероприятие стало проходить с участием НИИ механики МГУ.

Видеосеминар проводится в режиме интернет-видеоконференции на нескольких территориально распределенных площадках. Основными организациями-участниками семинара являются ЦАГИ, СПбПУ, ИПТМ СО РАН и НИИ механики МГУ, но зачастую подключаются и другие организации.

Архив видеозаписей семинара возник как побочный результат деятельности по техническому сопровождению и обеспечению качества связи и работы оборудования. Для решения этой задачи во время мероприятия производится полная запись передаваемых по сети данных с целью проведения их последующего анализа. На протяжении долгого времени информация, сохраненная в этих материалах, являлась единственным источником, позволяющим восстановить речь и изображения сделанных докладов.

Для восстановления информации из технических записей сетевого трафика потребовалось разработать специализированный программный комплекс, а также решить сопутствующие вопросы, связанные с хранением массива собранных данных и результатов их обработки.

В настоящее время решается вопрос с публикацией полученного архива.

Более подробная информация о видеоархиве представлена в отчете НИИ механики МГУ № 5356, где описан принцип работы программного комплекса, а также содержится перечень докладов семинара, материалы которых присутствуют в архиве.

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОДЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

М.Ш. Исраилов [1], *Д.О. Сердюк* [2], *Д.В. Тарлаковский* [3]

[1] Комплексный НИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, г. Грозный;
[2] НИУ МАИ, Москва;
[3] НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается связанная задача о совместных продольных колебаниях протяженного подземного сооружения (туннеля, трубопровода) и грунта при сейсмическом воздействии.

Объектом исследования является полубесконечный трубопровод, один торец которого зафиксирован, а другой свободен. Такой случай может быть реализован, если имеет место крепление к подземному резервуару или фундаменту, а другой удален на

достаточно большое расстояние от первого. Материал трубы принят упругим и изотропным. Предполагается, что напряженно-деформированное состояние грунта одномерное, а фронт сейсмического воздействия распространяется вдоль осевой линии трубы.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния трубы. При этом рассматривается дозвуковой и сверхзвуковой случаи: скорость распространения волн в трубе больше или меньше скорости распространения волн в грунте соответственно.

Колебания трубы в грунте описывается неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных. Для решения соответствующей начально-краевой задачи применяется преобразования Лапласа. Оригиналы представляются в виде сверток возмущения с ядрами, которые находятся аналитически.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-00787).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛОГИЧЕСКОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА В WEB-ПРИЛОЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ БИБЛИОТЕКИ DJANGO

А.А. Иткес

НИИ Механики МГУ

Реляционная модель логического разграничения доступа (ЛРД) разрабатывалась для управления доступом пользователей к объектам многопользовательских систем управления сетевым контентом. Примерами таких систем являются социальные сети, форумы, а также ИАС «ИСТИНА». Как и многие другие модели ЛРД для подобных систем, реляционная модель ЛРД основана на представлении подконтрольной системы в виде графа, вершинами которого являются объекты системы, а ребрами – отношения между ними. Права доступа пользователя к объекту зависят от вида путей, связывающих этого пользователя с целевым объектом в данном графе. В отличие от аналогичных моделей, реляционная модель ЛРД включает средства упрощения записи правил управления доступом к объектам за счет выделения часто повторяющихся фрагментов путей в специальные именованные блоки, которые можно использовать как обычные отношения между объектами. Кроме того, модель допускает правила управления доступом, которые могут зависеть от различных свойств как целевого объекта, так и вспомогательных объектов, входящих в цепочку, связывающую пользователя с целевым объектом.

В настоящее время ведутся работы над внедрением механизмов реляционной модели ЛРД в код ИАС «ИСТИНА». Для этого разработан специальный программный комплекс, который на основании описания модели порождает функцию, возвращающую список разрешенных видов доступа пользователя к объекту. Результат, возвращаемый этой функцией, зависит от результата запроса к базе данных системы, проверяющего наличие или отсутствие пути с определенными свойствами в социальном графе.

Был проведен сравнительный анализ механизмов реляционной модели ЛРД с механизмом Unifier_Permissions, используемым для управления доступом к объектам ИАС «ИСТИНА» в настоящее время. Механизм Unified_Permissions основан на использовании библиотеки Django_Authority, однако имеет ряд усовершенствований. К этим улучшениям относится возможность объединить виды прав доступа к объектам в иерархическую структуру, а также возможность использовать при принятии решения о предоставлении пользователю доступа к объекту сложные правила, не представимые в

виде SQL-запросов. Таким образом, механизм Unified_Permissions является более гибким по сравнению с использованием компилятора реляционной модели ЛРД и не зависит от специфических особенностей используемой СУБД. Одновременно с этим функции, порождаемые компилятором реляционной модели ЛРД, являются более быстрыми и легче поддаются проверке свойств корректности ввиду того, что полное описание правил управления доступом хранится в одном файле специального формата.

Таким образом, механизмы, порождаемые компилятором реляционной модели ЛРД, являются более производительными и более верифицируемыми по сравнению с механизмом Unified_Permissions. Вместе с тем они более чувствительными к специфическим свойствам используемой СУБД и менее выразительны при представлении условий предоставления пользователю прав доступа к объекту, в зависимости от атрибутов пользователя и целевого объекта. Одним из направлений дальнейшего развития реляционной модели ЛРД являются уменьшение влияния указанных недостатков ее программной реализации и разработка решения, сочетающего преимущества двух рассмотренных решений.

СУЩЕСТВОВАНИЕ ЛИУВИЛЛЕВЫХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О КАЧЕНИИ ЭЛЛИПСОИДА ВРАЩЕНИЯ ПО АБСОЛЮТНО ШЕРОХОВАТОЙ ПЛОСКОСТИ

М.О. Ицкович, А.С. Кулешов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается классическая задача динамики неголономных систем – задача о качении динамически симметричного эллипсоида вращения по неподвижной абсолютно шероховатой горизонтальной плоскости. При помощи алгоритма Ковачича доказывается отсутствие лиувиллевых решений в данной задаче для почти всех значений параметров. Указаны несколько случаев, когда при дополнительных ограничениях на параметры задачи существуют лиувиллевы решения. В этих случаях представлен явный вид найденных лиувиллевых решений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00338).

О ВЛИЯНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

А.Г. Калугин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Нематические жидкие кристаллы – это вещества, молекулы или структурные единицы которых обладают сильно вытянутой формой. В жидкокристаллической фазе длинные оси молекул в частице среды в среднем ориентированы вдоль определенного направления – единичного вектора ориентации (директора), описывающего анизотропные свойства среды. В случае, когда молекулы не являются симметричными относительно изменения направления длинной оси на противоположное и обладают электрическим дипольным моментом, в жидких кристаллах может наблюдаться так называемый флэксоэлектрический эффект, выражающийся, например, в поляризации деформированной среды или ее деформации при взаимодействии с электрическим полем. В результате

проявления этого эффекта, например, в ряде экспериментов наблюдаются периодические (доменные) структуры, возникающие в слоях нематика.

В представленной работе исследовано влияние граничных условий на образование флексоэлектрических доменных структур. Изучен случай слабого сцепления, когда положение вектора ориентации на границе определяется из условий минимума поверхностной энергии. Кроме этого, учитывались дивергентные слагаемые в объемной энергии упругости ориентации Франка, которые также влияют на граничные условия при такой постановке задачи. Для этой модели найдена зависимость периода доменных структур от параметров среды, которая может быть использована для определения флэксоэлектрических коэффициентов и дивергентной постоянной в энергии Франка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-00361).

О ПАРАДОКСЕ СИММЕТРИИ В ЗАДАЧЕ О ПРОНИКАНИИ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ ПЛОСКИХ СВОБОДНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

В.П. Карликов, А.Т. Нечаев, С.Л. Толоконников

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Обнаружен экспериментально новый парадокс симметрии (по терминологии Биркгофа) в задаче о проникании вертикальных свободных плоских турбулентных струй жидкости разной толщины через свободную поверхность жидкости. В опытах установлено, что, несмотря на наличие исходной симметрии в постановке опытов, в широких диапазонах значений скоростей, толщин струй и длин их свободных участков существуют четко выраженные регулярные автоколебательные режимы поперечного перемещения затопленных участков струй и эжектируемого струями воздуха в жидкость. Установлен механизм возникновения таких режимов и найдены зависимости периода автоколебаний в определенном диапазоне значений указанных определяющих параметров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00519; 15-01-00361).

О ПРОНИКАНИИ СВОБОДНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ В УЗКИХ ПЛОСКИХ КАНАЛАХ

В.П. Карликов, А.Т. Нечаев, С.Л. Толоконников

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Установлено в опытах существование автоколебательных режимов поведения затопленных участков струй и внедрения газовых пузырей при проникании свободных вертикальных осесимметричных струй в жидкость, находящуюся в узких плоских каналах. Построены зависимости безразмерного периода автоколебаний от числа Фруда и относительных длины свободных участков струй для нескольких значений отношения их диаметра к ширине канала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00519; 15-01-00361).

ОБ АВТОКОЛЕБАНИЯХ ЗАТОПЛЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТРУЙ В УЗКИХ ПЛОСКИХ КАНАЛАХ

В.П. Карликов, А.Т. Нечаев, С.Л. Толоконников

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Представлены результаты экспериментов с фонтанированием осесимметричных затопленных вертикальных в узких каналах с параллельными стенками при разных глубинах затопления, относительных диаметрах струй и начальных скоростях. Установлены диапазоны значений этих параметров, при которых существует регулярный автоколебательный режим поперечного перемещения струй и волн, возникающих на свободной поверхности. Обнаружен парадокс симметрии, аналогичный изученному авторами ранее в случае фонтанирования плоских затопленных струй.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00519; 15-01-00361).

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРИНЦИПЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ В ТЕОРИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ А.А. ИЛЬЮШИНА

А.Э. Карпов, А.В. Муравлев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина физическому процессу нагружения материальной частицы сплошной среды ставится в соответствие образ процесса нагружения этой материальной частицы, дающий геометрическое представление процессов изменения в ней напряжений и деформаций. Этот образ процесса нагружения включает в себя траекторию деформаций (годограф 5-мерного вектора деформаций $\mathbf{э}(t)$, построенного по девиатору тензора деформаций), в точках которой заданы текущие значения параметров процесса: времени t, длины дуги $s(t)$, давления $p(t)$, температуры $T(t)$, а также добавлены 5-мерные векторы напряжений $\boldsymbol{\sigma}(t)$ (построенные по девиатору тензора напряжений). В соответствии с общим постулатом изотропии теории упругопластических процессов, вектор напряжений $\boldsymbol{\sigma}(t)$ в каждой точке траектории деформаций полностью определяется физическим процессом деформирования по предшествующему этой точке участку траектории деформаций. Из общего постулата изотропии следует, что модуль $\sigma_u(t)=|\boldsymbol{\sigma}(t)|$ и углы $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$, $\varphi_4(t)$ 5-мерной сферической системы координат, задающие ориентацию вектора напряжений $\boldsymbol{\sigma}(t)$ в сопровождающем репере Френе траектории деформаций, являются функционалами пластичности от предшествующей истории деформирования, описывающими соответственно скалярные и векторные свойства связи напряжений с деформациями в упругопластических процессах. Частный постулат изотропии теории упругопластических процессов утверждает, что образ процесса нагружения инвариантен относительно ортогональных преобразований в пятимерном пространстве. Из частного постулата изотропии следует, что модуль $\sigma_u(t)$ и углы $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$, $\varphi_4(t)$ являются функционалами пластичности от параметров внутренней геометрии всего предшествующего участка траектории деформаций. Принцип запаздывания векторных свойств теории упругопластических процессов утверждает, что ориентация вектора напряжений $\boldsymbol{\sigma}(t)$ в сопровождающем репере Френе траектории деформаций определяется

историей деформирования на предшествующем участке траектории деформаций, имеющем длину дуги, равную величине следа запаздывания векторных свойств h_ε, являющегося материальной константой материала. Из принципа запаздывания векторных свойств и частного постулата изотропии следует, что углы $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$, $\varphi_4(t)$ являются функционалами пластичности от параметров внутренней геометрии предшествующего участка траектории деформаций, имеющего длину дуги, равную величине следа запаздывания векторных свойств h_ε. В данной работе для модели упруго идеально пластического материала проведен анализ векторных свойств на траекториях деформаций постоянной кривизны, т.е. на винтовых траекториях деформаций. Для винтовых траекторий деформаций в 3-мерном пространстве показано, что величина следа запаздывания векторных свойств, определяемая по длине дуги траектории деформаций, может неограниченно возрастать при значениях кривизны и крутки, соответствующих винтовым траекториям малого радиуса (меньше величины предела упругости ε_s) и малого угла подъема спирали. Также показано, что величина пластического следа запаздывания векторных свойств h_ε^p, определяемого по длине дуги траектории пластических деформаций, всегда оказывается ограниченной (в частности, для величины допуска ε, равной 0,1, получается $h_\varepsilon^p = 6\varepsilon_s$).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00669; 16-51-12024; 15-08-04281).

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ШАРНИРОВ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

М.Н. Кирсанов

НИУ «МЭИ», Москва

Для определения тензора напряжений в узлах ферм предлагается приближенный алгоритм вычисления деформаций по значениям удлинений стержней, соединенных с узлом. Для этого в случае трех стержней в узле строится поле перемещений как плоскость, проходящая через три точки, и по формулам Коши находятся компоненты деформаций. Если в узле соединено более трех стержней, то результат осредняется по всем возможным плоскостям, проходящим по комбинациям из трех точек.

НЕКОТОРЫЕ ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСШИРЕНИЯ И СЖАТИЯ СЛОИСТЫХ ПОЛЫХ ШАРОВ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

А.Б. Киселев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В докладе представлены новые точные решения одномерных задач расширения и сжатия полых толстостенных двухслойных сферических шаров и цилиндрических труб из несжимаемых вязкопластических материалов модели типа Соколовского – Пэжины под действием внешних и внутренних динамических нагрузок. Решения получены

в лагранжевых переменных и легко обобщаются на случай большего числа слоев, что важно для ряда технических приложений.

Они могут использоваться для расчета параметров напряженно-деформированного состояния конструкций, их разогрева, для оценки вклада вязкости в диссипацию энергии и момента начала макроразрушения (естественно, необходимо выбрать тот или иной критерий разрушения, например по предельной удельной диссипации). Эти точные решения могут найти применение для тестирования программ компьютерного моделирования и оценки эффективности новых численных методов.

Ранее ряд точных решений для одномерных динамических задач со сферической и цилиндрической симметриями в различных постановках был получен автором данного доклада для несжимаемой вязкопластической среды и вязкой жидкости Навье – Стокса (ПММ. 2012. Вып. 4; Вестн. МГУ. Матем. Механ. 2012. № 6; Прикл. физ. и матем. 2013. № 1; ПММ. 2014. Вып. 6.; Прикл. физ. и матем. 2014. № 6; Прикл. физ. и матем. 2016. № 2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-01541).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

А.Б. Киселев, Д.А. Пестов, В.В. Тюренкова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Гидроразрыв пласта является одним из основных способов увеличения продуктивности нефтяных и газовых месторождений. Моделирование данного процесса позволяет оптимизировать его проведение, позволяя либо минимизировать затраты для достижения заданного конечного результата, либо достичь большего результата при равных затратах.

В данной работе, с использованием методов механики сплошной среды, построена, а также численно реализована модель роста трещины гидроразрыва пласта в следующих предположениях:

· жидкость гидроразрыва вязкая и слабосжимаемая;

· горная порода вокруг трещины считается линейно упругой;

· присутствует утечка жидкости гидроразрыва в породу;

· толщина трещины принимается много меньшей в сравнении с ее длинной и шириной.

В модели предусмотрено отставание границы жидкости от края трещины (лаг), а также возможность остановки роста трещины в случае недостаточного давления закачиваемой жидкости. Полученная модель протестирована на аналитическом решении в случае отсутствия утечки.

С помощью данной модели исследована зависимость основных характеристик трещины (таких как длина и раскрытие) от свойств закачиваемой жидкости, окружающей породы, а также от параметров процесса закачки. В случае изменения вязкости закачиваемой жидкости при фиксированных проницаемости породы, скорости закачки и остальных параметрах обнаружены следующие зависимости: на начальном этапе роста трещины длина трещины растет быстрее в случае закачки менее вязкой жидкости, затем для наименее вязких жидкостей скорость роста тещины резко падает вследствие утечки жидкости в породу. Раскрытие трещины зависит от вязкости монотонно, с уменьшением вязкости уменьшается и раскрытие трещины.

Далее исследована зависимость роста трещины от режима закачки: при заданных параметрах породы и жидкости гидроразрыва изменялась только скорость закачки жидкости гидроразрыва в скважину, а в качестве параметра времени использовался объем закачанной в трещину жидкости. В таком случае раскрытие трещины монотонно зависит от скорости закачки. Ввиду утечки жидкости в породу, чем меньше скорость закачки, тем медленнее раскрывается трещина, в итоге тем меньше раскрытие трещины при одинаковом закачанном объеме жидкости. Для длины трещины зависимость получается немонотонная: для каждого значения объема есть скорость закачки, при которой достигается максимальная для данного объема длина трещины. Кроме того, с увеличением закачанного объема скорость закачки, при которой достигается максимум, возрастает. Это обусловлено тем, что на рост трещины оказывают влияние два механизма: утечка жидкости в породу и трение, причем в начале роста трещины большее влияние оказывает трение, а на более поздних этапах возрастает влияние утечки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-29-15076).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНОМАШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ТЕПЛООБМЕНА И УВЕЛИЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Н.А. Киселев [1,2], *А.Г. Здитовец* [1], *Ю.А. Виноградов* [1], *М.М. Стронгин* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

В данной работе представлены экспериментальные данные по исследованию влияния крупномасштабных вихревых структур на коэффициенты теплоотдачи на гладкой поверхности. Экспериментальные исследования проводились на дозвуковой аэродинамической установке НИИ Механики МГУ. Канал установки для определения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления имеет длину L = 1080 мм, высоту H = 30 мм, ширину B = 300 мм. Коэффициент сопротивления определялся путем прямого взвешивания поверхностей на плавающих элементах, установленных на однокомпонентных тензометрических весах с учетом падения статического давления на длине элемента. Для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена: с использованием ИК-камеры регистрировался процесс охлаждения нагретой стенки исследуемой пластины, а также (при помощи термопар) температура ядра потока.

В канал был установлен цилиндр диаметром Ø = 8 мм на расстоянии 0,66 м от среза сопла. Плавающие элементы с гладкими пластинами были установлены на расстоянии 40 мм (5 Ø) от цилиндра и 0,7 м от входа в канал. Величина зазора Y_0 между нижней стенкой и кромкой цилиндра варьировалась в диапазоне 1-21 мм. При проведении экспериментов определялось значение осредненного по площади плавающего элемента коэффициента сопротивления трения c_x за цилиндром (а также величина c_x / c_{x0}, где c_{x0} определялась по параметрам невозмущенного потока) при различных скоростях потока ($u_0 = 40\text{-}125$ м/с) и положениях цилиндра в канале (величина Y_0 составляла 1-7, 9, 11 и 21 мм). Коэффициент теплоотдачи S_t (и величина S_t / S_{t0}, отнесенная к коэффициенту теплоотдачи для гладкой стенки в канале без цилиндра) по длине пластины определялась для течения со скоростью невозмущенного потока 75 м/с для следующих положений цилиндра: Y_0 = 1-5, 7, 9, 11 и 21 мм.

Для рассматриваемых течений получены следующие результаты:

· максимальное значение $c_x / c_{x0} = 1,48\text{-}2,04$ (в зависимости от числа Рейнольдса Re_x) получено при расположении цилиндра на оси канала ($Y_0 = 11$ мм). При приближении цилиндра к противоположной стенке ($Y_0 = 21$ мм) величина касательного напряжения на стенке уменьшается до $c_x / c_{x0} = 0,00\text{-}0,17$. При уменьшении величины зазора до $Y_0 = 1\text{-}2$ мм отмечаются отрицательные значения относительного коэффициента трения, по-видимому, связанные с наличием протяженной области обратных токов в следе за цилиндром. Минимальное значение $c_x / c_{x0} = (-1,01)\text{-}(-0,71)$ соответствует наименьшему зазору $Y_0 = 1$ мм.

· интенсификация теплообмена за цилиндром рассматривалась на участке от 710 до 823 мм. Локальное значение S_t / S_{t0} для $Y_0 = 1\text{-}2$ мм имеет максимум на расстоянии 80 мм от оси цилиндра. При дальнейшем увеличении Y_0 до 9 мм наблюдается только снижение величины S_t / S_{t0} вдоль продольной координаты. При $Y_0 = 11$ мм локальный максимум наблюдается на расстоянии 90 мм от оси цилиндра. При $Y_0 = 21$ мм значения $S_t / S_{t0} = 1$. Локальные значения S_t / S_{t0} (кроме случая $Y_0 = 21$ мм) менялись в диапазоне $S_t / S_{t0} = 1,35\text{-}2,5$. Полученные данные удовлетворительно совпадают с данными работ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-08428) и Министерства образования и науки РФ (стипендия Президента РФ № СП-1169.2015.1).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДКИ СООРУЖЕНИЯ НА ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТАХ

Ф.Б. Киселев [1], *Ф.В. Сергеев* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИУ МГСУ, Москва

Предложена численная модель для определения осадки сооружения на мерзлом грунте. Осадка происходит за счет действия собственного веса грунта, веса возведенного сооружения и за счет оттаивания грунта под фундаментом сооружения из-за его разогрева. Учитывается скрытая теплота фазового перехода через температуру таяния льда в грунте. Решена модельная задача в связанной и несвязанной постановках. Проанализировано влияние эффекта связанности уравнений термоупругости на величину осадки сооружения.

ДИНАМИКА ДВУХПРОПЕЛЛЕРНОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

Л.А. Климина, Е.С. Шалимова

НИИ механики МГУ, Москва

Построена математическая модель двухпропеллерной горизонтально-осевой ветроэнергетической установки (ВЭУ) с дифференциальной планетарной передачей (ДПП). Один пропеллер жестко соединен с водилом ДПП, другой пропеллер – с внешним колесом ДПП, ротор генератора – с солнечной шестерней. Генератор установки подключен к локальной электрической цепи. Внешнее сопротивление в цепи является варьируемым параметром модели. Используется квазистационарная модель аэродинамических сил.

Электромагнитный момент, действующий на ротор генератора, считается линейной функцией угловой скорости ротора.

Проводится сравнение характеристик рабочих режимов ВЭУ при различных соотношениях радиусов колес ДПП. Исследуются вопросы существования и устойчивости соответствующих стационарных движений, проводится оценка механической мощности ВЭУ на рабочих режимах. Для случая конкретной геометрической конфигурации системы, при которой может быть реализован рабочий режим с механической мощностью близкой к максимальной, предлагается стратегия управления, позволяющего перейти на программный рабочий режим.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-01-06970; 16-31-00374; 17-08-01366).

АКУСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

В.К. Ковальков, А.В. Соколов, Я.Ю. Филиппов

НИИ механики МГУ, Москва

Повышение износостойкости твердосплавного инструмента достигают различными способами, в частности применяют ультразвуковую обработку [1], нанесение более износостойкого покрытия методами PVD или CVD [2], воздействием электронами высоких энергий [3], термообработкой, а также аэротермоакустической обработкой [4]. Все эти методы в той или иной степени увеличивают микротвердость поверхностного слоя. Однако износостойкость также связана и с механическими свойствами основы режущего инструмента, такими как упругость и предел прочности при изгибе. Аэротермоакустическая обработка твердосплавного инструмента заключается в воздействии на твердосплавный инструмент звуковыми волнами диапазона 200 Гц – 5 кГц и уровнем 140-180 дБ на предварительно нагретый инструмент до температур 200-300 °С. Целью данного исследования был выбор наиболее оптимальной технологии обработки твердосплавных резцов для увеличения их износостойкости. Влияние аэротермоакустической обработки на механические свойства сплава ВК6в было исследовано при воздействии на балочки из этого сплава размером 2,5х2,5х31,5 мм в сравнении с другими энергетическими воздействиями. Модуль упругости и предел прочности определяли в опытах на трехточечный изгиб. Всего было обработано и испытано более 500 балочек, каждому воздействию подвергалось не менее 30 балочек и соответственно получены результаты статистической обработки этих опытов. Термообработка резцов из сплава ВК8 при температуре 150 °С дала неожиданные результаты: резкое, почти в два раза уменьшение предела прочности и модуля упругости.

Литература

1. *Гершгал Д.А.* Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия, 1976.
2. *Локтев Д.* Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2011. – № 4.
3. *Полетика И.М.* Использование электронно-лучевой обработки для создания упрочняющих покрытий / И.М. Полетика, Т.А. Крылова, С.А. Макаров // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 2.
4. *Ерофеев В.К.* Аэротермоакустическая обработка металлов и сплавов / В.К. Ерофеев, Г.А. Воробьева, П.Г. Генкин // Металлообработка. – 2001. – № 6.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРСИЙ ПЕРЕВОДНЫХ СТАТЕЙ И СОАВТОРСТВА В БОЛЬШИХ КОЛЛЕКЦИЯХ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.С. Козицын, С.А. Афонин

НИИ механики МГУ, Москва

Для решения задач управления любым крупным ВУЗом требуется создание системы сбора, хранения и анализа больших объемов библиографической информации, которая описывает результаты научной деятельности его сотрудников. Одним из важнейших показателей являются число публикаций, а также их цитируемость, распределение по журналам и темам. При анализе этого показателя необходимо учитывать, что авторы вводят как оригинальные статьи, так и их переводы в иностранных журналах. Переводы статей также имеют большое значение для анализа, по ним может производиться дополнительный сбор информации о цитируемости автора, в том числе в метриках Web Of Science и Scopus. Однако было бы некорректным учитывать переводы как самостоятельные статьи при подсчете общего количества статей автора за период.

Сложность определения переводных версий статей обусловлена тем, что ввод в систему информации о статье и ее переводе может осуществляться не только в разное время по мере выхода изданий, но и разными авторами. В этой связи, становится актуальной задача автоматизации поиска и сопоставления переводных версий статей в процессе сбора подобной информации, поскольку ручная обработка таких объемов данных невозможна.

Одним и подходов к автоматизации процесса поиска переводных версий статей является использование статистических данных о распределении статей по журналам.

Разработанный авторами алгоритм состоит из двух этапов. На первом этапе производится поиск пар журналов, которые печатают переводные статьи. Поиск производится на основе сравнения количества похожих статей, имеющих одинаковый список авторов. Для быстрого сравнения списка авторов статей используется хэш-функция, позволяющая построить индекс по всему массиву статей, загруженных в систему. В рамках данной работы для сравнения журналов были опробованы разные метрики, использующие число статей в каждом из журналов и число статей, имеющих одинаковый набор авторов и отличающихся по дате публикации не более чем на год. Результатом работы первого этапа алгоритма является множество пар журналов, в одном из которых часто печатаются переводные статьи из второго журнала.

На заключительном этапе работы алгоритма на основе полученного списка пар журналов проводится поиск пар статей, которые опубликованы в этих журналах и удовлетворяют приведенным выше критериям: опубликованы одними и теми же авторами и дата публикации отличается не более чем на год. Полученные пары статей считаются возможными вариантами перевода.

Тестирование алгоритма проводилось на 78 тыс. статей, в качестве возможных переводов было выделено 2 тыс. статей, точность оценки составила 65 %. Основная сложность автоматического поиска переводов заключается в том, что многие авторы публикуют похожие результаты по нескольку раз, немного меняя название статьи. В таких случаях даже эксперту в предметной области трудно дать однозначную оценку, является статья не очень точным переводом или самостоятельной статьей.

Результаты работы алгоритма не позволяют точно выявлять переводы, однако позволяют уведомлять пользователей системы о наличии возможных переводов статей с возможностью поставить соответствующую отметку в данных о статье.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ВЫТЕСНЕНИЕ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

И.В. Козлов [1], *В.Ф. Никитин* [1], *Е.И. Скрылева* [2]

[1]ЦРН им.В.И. Шпильмана, г. Ханты-Мансийск;
[2]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Изучение процессов фильтрации жидкости в пористой среде является крайне актуальным; существует множество практических задач, для решения которых применяется теория фильтрационных течений. Одним из наиболее важных применений теории фильтрации являются связанные с нефтедобычей задачи. Один из методов добычи углеводородов – вытеснение их из нефтеносного пористого пласта с помощью менее вязкой жидкости. При этом на фронте вытеснения развивается неустойчивость, происходит размытие фронта. Эти процессы существенно влияют на коэффициент извлечения нефти.

На процесс вытеснения жидкостей из пористых сред оказывают влияние капиллярные эффекты. Для изучения влияния капиллярных сил на процесс фильтрации численно решается одномерная задача, рассматривается уравнение конвекции-диффузии, капиллярные эффекты учитываются при помощи моделей Брукса-Кори и Леверетта. В различных режимах работы программы есть возможность задавать на границе постоянный поток, постоянный перепад давления или отсутствие и того и другого (в этом случае течение происходит за счет одних капиллярных сил).

С помощью данного численного моделирования есть возможность подбирать коэффициенты в уравнении, отвечающие за размытие фронта, основываясь на экспериментальных данных. Рассматриваются эксперименты, описанные в статье [1]. В статье рассматривается три ячейки, заполненных пористой средой. В условиях микрогравитации происходило течение различных жидкостей (сырая нефть, смазочное масло, полимер в воде) в ячейках за счет только лишь капиллярных эффектов. Процесс контролировался с помощью 48 волоконно-оптических датчиков, расположенных вдоль длины ячейки. В результате были получены графики зависимости времени срабатывания датчика и его положения по длине образца. Было произведено 3 численных расчета, в которых параметры, отвечающие за свойства жидкостей и пористой среды брались из соответствующих экспериментов. Параметры отвечающие за рассеяние фронта подбирались на основании разброса точек на экспериментальных графиках.

Таким образом, численно решена задача одномерного течения жидкости в пористой среде с учетом капиллярных эффектов. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям «Умник 15-3» (грант № 0010335).

Литература

1. Filtration in Artificial Porous Media and Natural Sands under Microgravity Conditions // Microgravity sci. technol. – XIV/2 (2003).

О ВЛИЯНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДЯЩЕГО ТРУБОПРОВОДА НА КАВИТАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ

И.И. Козлов, С.А. Очеретяный, В.В. Прокофьев

НИИ механики МГУ, 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 распространение 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, – 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 подводящих 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).

УЛУЧШЕННАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ В ЗАДАЧЕ НАХОЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ КОМПОЗИТА

М.В. Козлов, С.В. Шешенин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Получен новый вид уравнений для аппроксимации экспериментальной зависимости температуры стеклования связующего от степени полимеризации, подходящий для широкого класса материалов. Предложена модель изменения скорости реакции полимеризации при застекловывании или расстекловывании и новое семейство уравнений кинетики полимеризации на ее основе, решения которых сохраняют класс гладкости $C^1(\mathbb{R}^+)$ в момент стеклования. Предложен эксперимент по нахождению среднего коэффициента теплоотдачи нагревательного шкафа. Найдена зависимость этого коэффициента от температуры для двух исследованных шкафов. С помощью построенной тепловой модели решена задача оптимизации температурного цикла отверждения для устранения перегрева толстой детали из композита – типового силового элемента авиационной конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Договор № 02.G25.31.0114) в рамках выполнения комплексного проекта по постановлению Правительства № 218 (шифр 2014-218-05-8228).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ PVT-СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РАСТВОРОВ

Е.В. Колдоба, А.Ю. Романова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

При прогнозировании разработки нефтяных и газовых месторождений широко используется модель «черной нефти». Для этого в лабораториях проводятся PVT-исследования флюидов (нефти, газа и водной фазы). Показано, что полученные экспериментальные результаты необходимо анализировать и уточнять с помощью компьютерного моделирования. И только после этого использовать уже обработанные измеренные функции для вычисления фильтрации. Так для вычисления функции растворения газа в нефти проводят лабораторный эксперимент DLE (differential liberation expansion). С помощью численного моделирования объяснены некоторые наблюдаемые эффекты.

Так, например, показаны области давлений-температур, в которых необходимо делать меньший шаг по давлению, иначе все результаты будут значительно искажены. Показано, что эффект не наблюдается для двух компонентных растворов и существенен для N-компонентных флюидов, из-за того что равновесная нода вращается в N-мерном пространстве.

Кроме того, показано, что для некоторых составов, эксперимент DLE дает значительную ошибку, так как «не видит» часть фазовой диаграммы при концентрациях более легких компонентов больше чем некоторая концентрация (концентрация «отсечки»).

УСКОРЕНИЕ РАСЧЕТОВ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ

Е.В. Колдоба, А.Ю. Романова, В.С. Станченко

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Показано, что полученые новые аналитические формулы для констант фазового равновесия (K-values) позволяют значительно ускорить и сделать более устойчивыми «точные» (численные) расчеты фазовых диаграмм многокомпонентных углеводородных растворов в композиционной модели (flash). В близи критической точки растворов ускорение не было получено. Поэтому предложен поправочный член, сводящие K-values к единице, так как в критической точке раствора K-values равны единице. Предложенная процедура делается только один раз для одной температуры (опорной), а полученные результаты затем могут быть пересчитаны по новой предложенной формуле и использоваться при других температурах.

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ ДЛЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Е.А. Коровайцева

НИИ механики МГУ, Москва

В работе рассматривается применение метода аналитического построения решения *n*-мерных нестационарных динамических задач вязкоупругости для тел произвольной геометрии. В общем случае такое решение может быть представлено в виде обобщенной свертки решений задачи о распространении одномерной нестационарной волны в вязкоупругом полупространстве и задачи о распространении *n*-мерной нестационарной волны в упругом теле, геометрия которого соответствует геометрии рассматриваемого в исходной задаче вязкоупругого тела. Рассмотрен пример построения поверхностных функций влияния для вязкоупругой полуплоскости. Предполагается, что наследственные свойства материала характеризуются двухпараметрическим экспоненциальным ядром релаксации. При этом решение вспомогательной одномерной задачи для вязкоупругого полупространства построено с использованием преобразования Лапласа и разложения в ряд по малому параметру. Для решения упругой двумерной задачи для полупространства в работе применено преобразование Фурье – Лапласа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 17-08-01146; 16-38-60074 мол_а_дк).

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РАДИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Е.А. Коровайцева [1], *Д.В. Тарлаковский* [1], *В.А. Щербаков* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]НИУ МАИ, Москва

Рассматриваются нестационарные радиальные колебания толстостенного цилиндра. Сплошная среда, из которой состоит цилиндрическое тело, принимается изотропной и электромагнитоупругой. Пьезоэффекты не учитываются. Взаимовлияние электрических и механических полей описывается системой уравнений, включающей в себя уравнение движения относительно радиальной компоненты вектора перемещений, уравнения Максвелла и линеаризованный обобщенный закон Ома. Описание движения точек сплошной среды осуществляется в цилиндрической системе координат с начальной точкой, лежащей на оси цилиндра. Все соотношения и параметры приводятся к безразмерному виду.

В начальный момент времени возмущения отсутствуют.

Внутренняя поверхность цилиндра жестко заделана от каких-либо радиальных смещений, а его внешняя поверхность находится под действием постоянного давления.

Для решения задачи применяется преобразования Лапласа по времени. Затем изображения раскладываются в степенные ряды по малому параметру. Получены явные формулы для изображений коэффициентов разложений компонентов напряженно-деформированного состояния и электромагнитного поля.

Для перехода в пространство оригиналов используется асимптотическое представление решения в окрестности начального момента времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-08-00788; 16-38-60074 мол_а_дк).

ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ УПРУГОГО МОМЕНТНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ

Е.А. Коровайцева [1], *Чан Ле Тхай* [2], *Д.В. Тарлаковский* [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]НИУ МАИ, Москва

Рассматривается нестационарная осесимметричная задача о распространении поверхностных возмущений от границы полупространства, заполненной упругой однородной изотропной средой Коссера. Для решения применяются преобразования Ханкеля по радиусу и Лапласа по времени. Оригиналы изображений находятся с помощью последовательного обращения преобразований Ханкеля и Лапласа, а также с использованием связи плоской и осесимметричной задач.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-08-00787; 16-38-60074 мол_а_дк).

РАСПАД ТОНКОГО ПЛОСКОГО СЛОЯ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В ГАЗЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В.М. Коровин

НИИ механики МГУ, Москва

На базе систем уравнений и граничных условий гидромеханики и электростатики в рамках нестационарной плоской линейной задачи исследовано развитие длинноволновых возмущений при движении в газе тонкого слоя невязкой несжимаемой диэлектрической жидкости. Жидкость однородна по физическим характеристикам и не содержит свободных электрических зарядов. Предполагается, что в невозмущенном состоянии поверхности раздела жидкость – газ параллельны, поле ортогонально слою, а газ покоится.

В случае достаточно высокой скорости слоя распад в отсутствие электрического поля вызывается аэродинамическими силами. При наличии начальных бесконечно малых возмущений амплитуды волн на поверхностях раздела, вызываемых силовым воздействием газа, нарастают в направлении потока жидкости. На финальной (нелинейной) стадии развития поверхностных волн формируется последовательность жидких фрагментов, вытянутых перпендикулярно направлению движения сплошного слоя. Затем фрагменты распадаются на капли.

При постановке нестационарной задачи учитываются: 1) изменение давления в газе вблизи поверхностей раздела; 2) капиллярные силы; 3) изменение плотности поляризационных сил, локализованных на поверхностях раздела. Силой тяжести пренебрегается.

Получено дисперсионное уравнение. Исследовано поведение поверхностных волн. Аналитически найдена длина наиболее быстро растущей волны, определяющей характерный поперечный размер фрагментов.

Проведенный анализ показал, что перпендикулярное электростатическое поле умеренной напряженности вызывает существенное уменьшение длины наиболее быстро растущей волны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00037).

МОДЕЛЬ УЛАВЛИВАНИЯ КАПЕЛЬ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА СВОБОДНУЮ ПЛЕНКУ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

А.А. Коротеев [1], *А.Н. Осипцов* [2], *Е.С. Попушина* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Одна из возможных схем системы охлаждения перспективных космических аппаратов предполагает осуществление распыливания жидкого теплоносителя в открытом космосе для увеличения поверхности радиационного теплообмена. Существенной технологической проблемой является последующий сбор капель в открытом космосе и возвращение теплоносителя в космический аппарат для организации замкнутого цикла теплообмена и охлаждения аппарата. В работе рассматривается модельная задача об осаждении заданного потока жидких капель на специально созданную свободную жидкую пленку (пелену) в условиях открытого космоса. Целью работы является определение параметров стационарного течения в пленке и ее возможное отклонение под действием осаждающихся по инерции капель. Предполагается, что капли полностью поглощаются пленкой, возможным разбрызгиванием пленки и наличием вторичных капель пренебрегается. В рамках приближения тонкого слоя вязкой жидкости выведены уравнения жидкой пелены с учетом притока в пленку массы и импульса за счет осаждающихся капель. Уравнения пелены записаны в криволинейной системе координат, связанной с «нижней» (свободной) поверхностью пелены. Разработан численный алгоритм и проведены параметрические расчеты профилей скорости жидкости в пелене, формы поверхностей пелены и изменения потока импульса в пелене с развитием течения по продольной координате. Определены основные параметры подобия рассматриваемого течения, найдены диапазоны указанных параметров, предпочтительные для возможных технологических приложений.

ПОДСИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ WEB-СТРАНИЦЫ НАУЧНОГО СЕМИНАРА В ИАС «ИСТИНА

А.А. Коршунов

НИИ механики МГУ, Москва

Семинар (научный семинар) – обсуждение сравнительно небольшой группой участников подготовленных ими научных докладов, сообщений, проводимое под руководством ведущего ученого, специалиста. Научные семинары традиционно являются эффективными формами научно-образовательного процесса. В свете более широкого распространения методов наукометрии для оценки деятельности как отдельных

персоналиев, так и организации в целом необходимо обеспечивать учет различных форм участия в организации и проведении научных семинаров.

Научные семинары имеют уникальные особенности с точки зрения научно-образовательного процесса и получили широкое распространение как в организациях высшей школы, так и в научно-исследовательских институтах. Возможность представить полученные результаты для глубокого обсуждения в кругу специалистов-экспертов позволяет не только оценить их новизну, корректность и достоверность, но и получить новые идеи для дальнейшего развития. Для студентов и аспирантов участие в научных семинарах позволяет окунуться в среду практического применения научных результатов, познакомиться с подходами и методиками организации процесса научных исследований, попробовать свои силы в презентации своих достижений.

С учетом изложенного, основными задачами подсистемы поддержки WEB-страницы научного семинара в ИАС «ИСТИНА» является предоставления механизмов ввода информации о различных формах участия персоналия в научном семинаре и формирование презентационной (WEB-страницы) семинара, на которой можно было бы ознакомиться с общей информацией о семинаре, планом работы, архивом выступлений и т.п.

Подсистема «Научные семинары» выполнена в виде приложения (в терминах среды DJANGO, на основе которой функционирует ИАС «ИСТИНА»).

Подсистема «Научные семинары» предоставляет набор средств для сбора, хранения и обработки информации о научных семинарах. Такая информация включает в себя общие данные о семинаре, а также сведения о докладах, которые планируются или были сделаны на семинаре, план семинара, архив докладов. Подсистема «Научные семинары» обеспечивает формирование презентационной страницы (WEB-страниц), которая является общедоступной для всех посетителей сайта ИАС «ИСТИНА». На этой странице отображаются объявления о предстоящих докладах и есть возможность ознакомится с планом работы семинара и архивом выступлений.

Подсистема реализована с использованием механизма представлений, описанных в виде классов (Class-based view). Данный подход существенно уменьшает количество программного кода, улучшает «читаемость» кода, обеспечивает повторное использование кода, позволяет сосредоточиться на реализации необходимой функциональности за счет уменьшения объема вспомогательной работы (такой как обработка метода HTTP-запроса, валидация форм, заполнение контекста и т.п.).

Основная идея такого подхода заключается в том, что для обработки запроса определяется класс вместо функции (Function based view). Это позволяет осуществлять наследование от базовых классов, которые реализуют вспомогательные функции.

Для соблюдения принципа повторного использования кода в подсистеме используется механизм примесей. Примесь представляет собой набор общий функций или свойств. Например, во время создания и во время редактирования экземпляра информационного объекта можно выделить часть одинаковых операций, однако для обработки запросов используются разные классы. В этом случае общие операции реализуются в виде примеси, которая внедряется в соответствующие классы.

В настоящее время подсистема реализует следующие основные функции, которые можно разбить на две группы.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ОБЪЕКТЫ

С.А. Косинов [1], *Е.В. Михальченко* [2], *В.А. Нерченко* [2], *В.Ф. Никитин* [1,2], *Л.И. Стамов* [1,2], *В.В. Тюренкова* [2], *Ю.Г. Филиппов* [1]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[1]ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

В работе рассматриваются проблемы защиты от воздействия внешнего электромагнитного поля (ЭМП) высокой частоты (волн миллиметрового и сантиметрового диапазонов). Основные опасности воздействия постороннего высокочастотного поля на электронные устройства заключаются в следующем: внесение помех в электрические цепи, нагрев элементов и временный выход из строя (вследствие нарушения температурных условий эксплуатации), нагрев элементов с последующим их разрушением. При еще более мощном воздействии возможен не только нагрев, но и механическое воздействие силами Лоренца на проводники (но такие поля имеют место лишь в окрестности генератора). Возможно как штатное воздействие радаров и иных источников ЭМП, так и намеренное («электромагнитное оружие»).

Основным принципом неактивной защиты от ЭМП является то, что переменное электромагнитное поле проникает в проводник лишь на глубину скин-слоя, зависящего от проводимости и магнитной проницаемости материала, а также частоты поля. Лучшие защитные материалы должны иметь максимальное значение проводимости, умноженной на магнитную проницаемость. Из широко применяемых материалов известны мю-металл (сплав ферритов) и пермаллой (сплав железа с никелем). Недостаток любой такой защиты – это нагрев ее наведенным переменным током. При превышении температурой точки Кюри магнитная проницаемость падает скачком. При еще более высокой температуре происходит расплавление защитного проводника. Чем толще скин-слой, тем сильнее воздействие термическое воздействие наведенных токов на проводник.

Спецификой защиты космических аппаратов от внешнего ЭМП является их возможная высокая (орбитальная) скорость относительно источника излучения. При такой скорости эффект Допплера, который мог бы повлиять на частотные характеристики поля, незначителен в силу малости орбитальной скорости по сравнению со скоростью света, но имеет место эффект воздействия магнитного поля на ток в проводнике, учитывающийся в модификации закона Ома (его природа – сила Лоренца, действующая на подвижный заряд). В работе было показано, что этот эффект незначителен для обычных скоростей объектов в земных условиях, но проявляется в значительной мере для скоростей порядка нескольких километров в секунду и выше. В результате скин-слой, который в обычном защитном слое из пермаллоя имеет для ЭМП с волнами сантиметровой длины размер менее 1 микрона, только за счет этой скорости может возрасти в несколько сотен раз по глубине. Даже если тепло с внешней поверхности защитного слоя отводится излучением, а на внутренней температура поддерживается термостатом, то все равно установившаяся температура внешней поверхности резко увеличится. Для параметров, протестированных в работе, установившаяся температура для нулевой скорости была 370 К (термостат 300 К), в то время как при удалении от источника ЭМП со скоростью 8 км/с, она становится 450 К. Наоборот, при приближении к источнику со скоростью 8 км/с глубина скин-слоя уменьшается и установившаяся на внешней поверхности температура становится 320 К.

Это показывает, сколь сильное значение имеет математическое моделирование подобных явлений, поскольку лабораторный эксперимент по испытанию защитного материала с учетом подобной скорости относительно источника ЭМП невозможен либо чрезмерно затруднен.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-29-09128).

ЭФФЕКТ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ С ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЕЙ

В.В. Косьянчук [1,2], *А.Н. Якунчиков* [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

В данной работе изучалось свободномолекулярное течение газа в микроканале, по стенкам которого распространяются упругие волны. Данная постановка исследовалось в предположении, что за счет таких колебаний можно добиться эффекта разделения газа. В результате расчетов получено, что вероятность прохождения через канал для молекул того или иного газа существенно зависит от соотношения скорости бегущей волн и тепловой скорости молекул, а значит, будет различаться для газов с разной молекулярной массой. Также показано, что характер этой зависимости тесно связан с соотношениями остальных параметров задачи, таких как амплитуда и длина волны, диаметр и длина канала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что за счет волновых движений стенок микроканала можно добиться эффекта разделения газов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В АСИММЕТРИЧНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАЗОРЕ

В.Д. Котелкин [1], *А.А. Монахов* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Исследовались течения несжимаемой вязкой жидкости, возникающие в зазоре между двумя цилиндрам вследствие вращения внешнего цилиндра. В асимметричном случае давление изменяется по длине зазора – появляются участки повышенного и пониженного давления. При изучении явления паровой кавитации в насыщенной газом жидкости интерес представляет область низкого давления, в которой образуются пузырьки. Для проектирования цилиндрических подшипников важно правильно рассчитать область высокого давления. Известно, что амплитуда вариаций давления резко возрастает с уменьшением минимального зазора.

Сначала было проведено экспериментальное исследование зависимости экстремальных давлений от величины зазора и скорости вращения цилиндра. Такие измерения становятся затруднительными для малых зазоров (меньше 0,1 мм). Поэтому наши исследования были дополнены численно-аналитическими решениями, что позволило получить все необходимые результаты в широком диапазоне изменения радиусов и эксцентриситета цилиндров. В сообщении будут представлены полученные решения и результаты.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АВТОВОЛН В ОБЛАСТЯХ ФОТОДИССОЦИАЦИИ

К.В. Краснобаев [1,2], *Р.Р. Тагирова* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]ИКИ РАН, Москва

Применительно к областям фотодиссоциации вблизи О и В звезд исследуется тепловой баланс межзвездной среды в условиях взаимодействия ультрафиолетового излучения с пылинками и крупными молекулами полициклических ароматических углеводородов. Принимается, что охлаждение газа происходит в результате возбуждения ионов углерода, атомов кислорода и дезактивации вращательных уровней молекул моноокиси углерода. Проведен анализ выполнения критерия тепловой неустойчивости, оценено влияние теплопроводности на инкременты нарастания возмущений, определены области неустойчивостей изобарического типа (в газе низкой плотности и при относительно слабом излучении от звезд) и акустических волн (в очень плотной среде и под действием излучения высокой интенсивности). Установлено, что неустойчивость акустических волн морфологически может проявляться в виде нитевидных или сетчатых структур с увеличенными по сравнению с окружающим газом значениями плотности и температуры. Такие структуры наблюдаются, в частности, в RCW 120. Присутствие множественных ударных волн может проявляться также в виде значительных изменений параметров среды (плотности, скорости, температуры) на малых масштабах порядка толщины ударного фронта. На существование подобных флуктуаций указывает анализ нерегулярных скоростей в туманности Ориона. При этом предсказываемая моделью скорость газа за фронтом ударной волны в режиме насыщения амплитуды автоволн достаточно хорошо согласуется с наблюдениями.

ОБ УСКОРЕНИИ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЗА СЧЕТ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ ТЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ КУБА

Б.И. Краснопольский

НИИ механики МГУ, Москва

В докладе обсуждаются возможности ускорения расчетов на многопроцессорной вычислительной технике задач, связанных с прямым численным моделированием турбулентных течений. Ранее была предложена модифицированная расчетная процедура, основанная на одновременном моделировании нескольких состояний турбулентного течения и последующем осреднении результатов. Сформулированы критерии и теоретические оценки, демонстрирующие возможность и величину потенциального ускорения расчетов.

Настоящая работа посвящена практической проверке предложенного алгоритма и теоретических оценок на примере задачи о моделировании турбулентного течения при обтекании массива кубов, расположенных на стенке плоского канала. Проведены расчет в рамках стандартного подхода, предполагающего длительное интегрирование одной реализации течения, и расчет с одновременным моделированием четырех реализаций турбулентного течения. Показано, что результаты обоих расчетов с удовлетворительной

точностью совпадают между собой и с экспериментальными данными. Использование модифицированной расчетной методики позволяет сократить время расчета задачи до полутора раз, а полученное ускорение хорошо согласуется с теоретическими оценками.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-0140).

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ВЕТВЕЙ ВЫЧИСЛЕНИЙ В УНАСЛЕДОВАННОМ КОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ПРОГРАММ

М.А. Кривчиков

НИИ механики МГУ, Москва

Работа, результаты которой представлены в докладе, выполнена в контексте задачи получения параллельной версии кода математического моделирования теплогидродинамических процессов в сложной системе. Код написан на языке программирования Fortran со статическим распределением памяти в common-блоках. Параллельное исполнение необходимо реализовать на основе стандарта MPI. Настоящий доклад дополняет техническую сторону работ, описанную в ранних докладах по этой тематике, строгим математическим описанием подхода.

Используется предложенная автором опубликованная ранее математическая модель динамического параллельного исполнения программ, из которой был удален оператор цикла while, что позволяет исключить незавершимые вычисления из модели. Это свойство, в свою очередь, позволяет описать модель в терминах конструктивной теории типов. Моделью динамического параллельного исполнения программ естественным образом порождается предметно-ориентированный язык динамического исполнения, в целом аналогичный Т-подходу к автоматизированному динамическому распараллеливанию программ.

Для подмножества языка Fortran, используемого в коде, который является объектом исследования, описана статическая семантика и ограниченная динамическая семантика. При построении статической семантики выделяется информация о чтении и записи отдельных блоков памяти, после чего состояния блоков нумеруются, аналогично представлению SSA (Static Single Assignment Form). Динамическая семантика формулируется в терминах подстановки значений из заданного блока в заданном состоянии. В общем случае применение такого подхода затруднительно, однако структура исследуемого кода допускает такое описание динамической семантики.

Полученная модель семантики кода удовлетворяет требованиям к семантике базового языка для модели динамического параллельного исполнения программ. Операторы присваивания заменяются на операторы порождения нового потока вычислений модели динамического параллельного исполнения. Корректность преобразования гарантируется теоремой о корректности параллельного исполнения, доказанной автором ранее, а также может быть проверена в явном виде с помощью метода абстрактной интерпретации. Для выполнения программы в вычислительной среде, поддерживающей стандарт MPI, может использоваться статическое или динамическое планирование доступных ветвей выполнения на основе модели стоимости вычислений и пересылок. Поскольку исследуемый код распространяется в составе аппаратно-программного комплекса, статическое планирование с учетом специфики аппаратной платформы является предпочтительным вариантом. Учитывая NP-трудный характер

задачи планирования, статическое планирование может дать лучший результат с учетом большего времени, доступного на оптимизацию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-07-01178).

МЕТОДОЛОГИЯ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕКОМБИНАЦИИ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА НА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.А. Крупнов

НИИ механики МГУ, Москва

В работе предлагается методология расчета коэффициентов скоростей элементарных стадий взаимодействия диссоциированного газа с каталитической поверхностью. Моделирование состоит из нескольких последовательных шагов.

1. Задание структуры материала поверхности и выбор кластера, описывающего его основные свойства. Выбор соответствующего базисного набора и функционала, позволяющих с необходимой точностью рассчитать равновесное состояние кластера.

2. Построение кинетической модели взаимодействия диссоциированного газа с поверхностью с учетом реакций адсорбции/десорбции, поверхностной диффузии, ударной (механизм Или-Райдилп) и ассоциативной (механизм Ленгмюра – Хиншельвуда) рекомбинации.

3. Поиск в рамках квантово-механического расчета возможных мест адсорбции атомов на поверхности и выбор наиболее эффективных из них по энергиям адсорбции.

4. Определение переходных состояний рассматриваемых реакций и их пути. Расчет энергий и частот колебаний переходных комплексов.

5. Расчет по теории переходного состояния Эйринга – Эванса – Поляни констант скоростей элементарных стадий на основании полученных частот и энергий.

Отметим, что теория переходного состояния не является точной и фактически дает оценку сверху реального коэффициента скорости реакции. Для более точного определения коэффициентов скоростей реакций требуется построение поверхности потенциальной энергии для каждой реакции, определение потенциала взаимодействия и дальнейшее молекулярно-динамическое моделирование. Это связано с огромными затратами вычислительных ресурсов, так как поверхность потенциальной энергии для изучаемых процессов представляет собой $(3n\text{-}6)$-мерное пространство, где n – число атомов с системе кластер + адсорбированный атом + газофазный атом.

УЧЕТ СУХОГО ТРЕНИЯ В МОДЕЛЯХ КАЧЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМОГО КОЛЕСА

П.А. Кручинин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

При моделировании движения автомобиля обычно учитывают зависимость главного вектора и главного момента контактных сил (стабилизирующего момента), приведенных к центру отпечатка контакта, от величины относительного проскальзывания. Вектор относительного проскальзывания равен отношению абсолютной скорости центра контактного отпечатка к модулю скорости точек периферии колеса во вращательном

движении. Моментом «трения верчения», порожденным вращением колеса вокруг вертикальной оси, исследованию которого в современной российской литературе уделяется большое внимание, традиционно пренебрегают.

В докладе рассмотрено описание типовых экспериментальных зависимостей для контактных сил, действующих при качении деформируемого колеса, с помощью щеточной (brush) модели. Колесо полагается плоским и расположенным вертикально. Считается, что центр колеса движется со скоростью, направленной горизонтально. Колесо вращается вокруг собственной оси вращения и вокруг вертикальной оси. Рассмотрен случай, когда характерное время изменения скоростей движения колеса много больше времени нахождения точки периферии колеса в области контакта. Внешний контур колеса моделируется набором бесконечно малых щетинок – упругих безынерционных контактных элементов. Опорный конец каждой из щетинок взаимодействует с поверхностью по закону сухого трения. Тогда при качении колеса после вступления в контакт с дорожной поверхностью конец щетинки с координатой неподвижен, на колесо в плоскости контакта со стороны щетинки действует упругая элементарная сила, пропорциональная горизонтальной деформации щетинки в соответствии с законом Гука. Начиная с некоторой точки, упругая сила, которую создавала бы щетинка, если бы ее конец оставался неподвижен, превышает максимальное значение силы трения и погонная контактная сила выражается через коэффициент сцепления и парциальную составляющую нормальной реакции опоры. Выражение для контактной силы записывается в результате суммирования (интегрирования) парциальных сил для всех щетинок в области контакта.

Такая модель позволяет получить соотношения для главного вектора и главного момента контактных сил, приближенно описывающие экспериментальные зависимости. Выписаны конечные соотношения для этих сил для строго продольного движения колеса и для случая «чистого увода». В отличие от предшествующих работ обсуждаются условия корректности пренебрежения «моментом трения верчения».

О МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С БЫСТРО ВИБРИРУЮЩИМИ СВЯЗЯМИ

Е.И. Кугушев, М.А. Левин, Т.В. Попова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается натуральная лагранжева система, на которую наложена дополнительная голономная нестационарная связь, причем зависимость от времени входит в эту связь через параметр, совершающий быстрые периодические колебания. Такую связь будем называть вибрирующей. Примером вибрирующей связи является задание вынужденных быстрых периодических колебаний одной из обобщенных координат исходной системы. Получены уравнения движения системы с вибрирующей связью в форме уравнений Гамильтона. Показано, что структура гамильтониана системы имеет специальный вид удобный для вывода усредненных уравнений. Использование метода усреднения позволяет получить предельные уравнения движения системы при стремлении частоты вибраций к бесконечности и доказать равномерную сходимость решений уравнений Гамильтона к решениям предельных уравнений на конечном отрезке времени. Приводятся примеры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-03747).

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ТИПА ТИМОШЕНКО

Ел.Л. Кузнецова [1], *А.Ю. Митин* [1], *Г.В. Федотенков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается пространственная нестационарная задача о движении круговой цилиндрической оболочки типа Тимошенко под действием внешнего давления. В начальный момент времени оболочка находится в состоянии покоя.

Для решения используется принцип суперпозиции, согласного которому перемещения оболочки есть свертки функций влияния с поверхностным давлением. Функции влияния для оболочки представляют собой перемещения в ответ на воздействие мгновенно приложенного сосредоточенного давления, математически описываемого произведением дельта-функций Дирака по времени и пространственным координатам. Для построения функций влияния используются разложения в тригонометрические ряды Фурье по окружной координате, интегральное преобразование Фурье по продольной координате и интегральное преобразование Лапласа по времени. Оригиналы коэффициентов рядов находятся с помощью оригинального алгоритма, основанного на разложении в ряды Фурье на переменном интервале, зависящем от времени.

Для получения решения о воздействии на оболочку нормального давления построен и реализован на ЭВМ оригинальный алгоритм, основанный на методе весовых коэффициентов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-38-70024 мол_а_мос).

МЕТОД ПОИСКА И ИНДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Ел.Л. Кузнецова [1], *А.О. Сердюк* [1], *Г.В. Федотенков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Для большинства практических задач неразрушающего контроля с произвольной геометрической формой контролируемых объектов феноменологический подход к решению обратных геометрических задач идентификации дефектов наталкивается на серьезные трудности, что значительно ограничивает применение этого метода на практике. Поэтому для эффективного решения сложных проблем диагностики и идентификации актуальной задачей является разработка универсального метода, пригодного для распознавания дефектов в сложных системах трубопроводов (теплотрассы, системы отопления и газоснабжения объектов коммунального хозяйства и т.п.). Для решения этих важных задач предлагается универсальный подход, основанный на методе конечных элементов, вейвлет-преобразовании и искусственной нейронной сети. В этом случае геометрически обратная задача формулируется как задача о распознавании дефекта по его характерным признакам, выделяемым из соответствующего сигнала (структурного отклика), регистрируемого измерительными датчиками. При этом непрерывное пространство решений обратной задачи разбивается на конечное число подпространств, относящихся к известным классам дефектов. Каждый дефект обладает заданным набором (вектором) признаков, который определяет принадлежность этого дефекта к

определенному классу. Для решения задачи классификации предлагается использовать нейронную сеть. Характерной особенностью всех методов, основанных на алгоритмах классификации или распознавания сигналов, является то, что они опираются на заранее сформированный банк данных, содержащий соответствующие вектора признаков всех типов дефектов. Это множество векторов признаков относится к так называемой обучающей выборке, которая используется для обучения нейронной сети. Таким образом, первой научно-технической задачей при разработке системы обнаружения повреждений конструкции с использованием нейронной сети является формирование начального состояния базы данных повреждений, которое будет использовано в качестве входных данных процесса обучения искусственной нейронной сети. Для выполнения этой задачи использован метод конечно-элементного моделирования.

Для формирования вектора признаков, соответствующего определенному дефекту, предлагается использовать дискретное вейвлет-преобразование. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты обладают способностью представлять локальные особенности сигналов с большей степенью точности и решать проблемы выявления дефектов более точным, комплексным способом.

Для классификации и распознавания дефектов предлагается использовать нейронную сеть. Для обучения нейронной сети возможно применить алгоритм обратного распространения ошибки. Он действует итеративно, его шаги называются эпохами. На каждой эпохе на вход сети поочередно подаются все обучающие примеры (векторы-признаки дефекта), выходные значения сети сравниваются с желаемыми значениями и вычисляется погрешность. Значение погрешности, а также градиента поверхности состояний используется для коррекции синаптических весов, и действия повторяются. Процесс обучения прекращается или если пройдено определенное количество эпох, или если погрешность достигает определенного уровня малости, или если погрешность перестает уменьшаться.

НЕЛИНЕЙНЫЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ ЗА ФРОНТОМ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

А.Г. Куликовский, Е.И. Свешникова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Рассматривается автомодельная задача о набегании потока идеальной жидкости или невзаимодействующих между собой частиц на плоскую неподвижную стенку с образованием упругой среды в результате уплотнения и соединения частиц в сплошную среду. Набегающий поток однородный, его нормальная к стенке и касательные компоненты считаются произвольно заданными. Считается, что образующаяся на фронте затвердевания упругая среда несжимаемая, нелинейная, обладает анизотропией и присоединяется к неподвижной стенке без проскальзывания, в результате чего в ней образуются касательные напряжения и, соответственно, деформации сдвига, которые также принимаются произвольно заданными (нормальные компоненты деформации отсутствуют вследствие несжимаемости). Таким образом, в задаче имеется три свободных параметра – две компоненты деформаций сдвига на стенке и скорость фронта затвердевания, заменяющая, вследствие закона сохранения массы, нормальную составляющую скорости потока. Решение задачи естественно представлять в фазовом пространстве параметров, входящих в постановку задачи.

На фронте затвердевания возникают упругие деформации, которые не обязаны совпадать с заданными на стенке. Поэтому в образовавшейся на фронте упругой среде

между ним и стенкой возникает последовательность нелинейных упругих волн, которую и требовалось построить.

Деформационное состояние за фронтом затвердевания найдено в результате исследования структуры фронта. Это множество состояний за фронтом (аналог ударной адиабаты) в фазовом пространстве состояний состоит из частей разной размерности в зависимости от скорости фронта и имеет в этих частях поля деформаций разного вида. Поэтому для каждой такой части ударной адиабаты задача об упругих волнах решалась отдельно. Каждую из них можно трактовать как задачу о поршне в газовой динамике. В результате для всех возможных свободных параметров задачи (а именно, скорости фронта и двух компонент деформации сдвига на стенке) построено решение в виде последовательностей плоских волн, первой из которых идет фронт затвердевания, а далее следуют нелинейные упругие волны (ударные или волны Римана) в порядке убывания скоростей с возможными однородными состояниями между ними.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОПУЗЫРЬКОВ ГАЗА НА ВЯЗКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ КОНТАКТА ВОДЫ И ГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Т.А. Латышева [1], *А.Н. Якунчиков* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Экспериментально обнаружено, что на гидрофобных поверхностях, погруженных в жидкость, могут образовываться нанопузырьки газа, влияющие на силу сопротивления при обтекании таких поверхностей жидкостью [1]. Поэтому изучение данного явления является актуальной задачей.

В работе исследуется задача о нанопузырьке газа на гидрофобной поверхности, погруженной в воду, с помощью подходов молекулярно-динамического моделирования [2, 3]. Расчетная область представляет собой периодическую в двух направлениях ячейку. По направлению, которое не является периодическим, область ограничена с двух сторон атомными структурами, моделирующими поверхности твердого тела. Каждая такая поверхность состоит из трех слоев атомов, расположенных согласно гранецентрированной кубической решетке. Ее 111-поверхность находится в контакте с жидкостью. Для реализации взаимодействия между частицами выбраны специальные потенциалы. Для воды выбрана модель SPC flexible [4], которая учитывает внутримолекулярные взаимодействия, тем самым допуская движения атомов в молекуле друг относительно друга. Между собой молекулы взаимодействуют посредством потенциалов Леннарда-Джонса и Кулона. Потенциал Кулона является дальнодействующим, поэтому необходимо учитывать действия на частицы со стороны дальних частиц. Это требует больших вычислительных затрат. Был разработан эффективный способ ускорения вычисления, основанный на разложении кулоновского потенциала в ряд Тейлора. Взаимодействия молекул воды с атомами стенок моделируется с помощью потенциала Леннарда-Джонса с соответствующими параметрами. С помощью разработанного метода исследовалась задача Куэтта о течении воды между двумя поверхностями, одна из которых движется с постоянной скоростью в своей плоскости, в присутствии и в отсутствии нанопузырька газа на границе контакта. Оценивалось влияние нанопузырька на вязкое сопротивление при таком течении.

Литература

1. *Ishida N.* Nano bubbles on a hydrophobic surface in water observed by tapping-mode atomic force microscopy / N. Ishida, T. Inoue, M. Miyahara, K. Higashitani // Langmuir. – 16 (2000) 6377-6380.
2. *Моисеева Е.Ф.* Исследование контактного угла и объема поверхностного нанопузырька методами молекулярной динамики / Е.Ф. Моисеева, Д.Ф. Марьин, В.Л. Малышев и др. // Матем. моделирование. – 2015. – 27:4.
3. *Рапапорт Д.К.* Искусство молекулярной динамики / Д.К. Рапапорт / Пер. с англ. А.Н. Дьяконовой; под науч. ред. Р.Г. Ефремова. – М.: ИКИ, РХД, 2012.
4. *Wu Y.J.* Flexible simple point-charge water model with improved liquid-state properties / Y.J. Wu, H.L. Tepper, G.A. Voth // J. Chem. Phys. – 2006. – 124, 024503/1-024503/12.

УСТОЙЧИВОСТЬ И СТАБИЛИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДИСКА, НЕСУЩЕГО ГИРОСКОП

Д.А. Лебедев

НИИ механики МГУ, Москва

В данной работе рассматривается механическая система, состоящая из диска, который может катиться по горизонтальной плоскости без проскальзывания и ротора – динамически симметричного твердого тела, соосного с диском и с центром масс вне плоскости диска.

Отсутствие проскальзывания между диском и плоскостью обуславливает две неголономные связи, в соответствии с которыми скорость точки контакта между диском и плоскостью равна нулю. Эти связи позволяют понизить порядок системы.

Уравнения движения для данной системы были написаны в форме уравнений Эйлера-Лагранжа в квазикоординатах [1]. Анализ уравнений движения показал [2], что в системе имеются одна позиционная и три циклические квазикоординаты. Было определено многообразие стационарных движений, когда позиционные квазикоординаты и циклические квазискорости остаются постоянными. Положив скорость вращения системы относительно вертикальной оси равной нулю, получили условие качения диска по прямолинейной траектории. При выполнении этого условия проекция центра масс системы на горизонтальную плоскость совпадает с точкой контакта диска и плоскости.

Показано, что в системе имеется три линейных интеграла, при помощи которых можно из уравнения для позиционной квазикоординаты исключить возмущения циклических квазискоростей. Характеристическое уравнение для приведенной системы имеет вид

$$W\lambda^2 + \tilde{K} = 0.$$

Для устойчивости прямолинейного качения необходимо, чтобы корни характеристического уравнения были чисто мнимыми. Это условие выполняется при $\tilde{K} > 0$, но $\tilde{K}$ – является квадратным трехчленом относительно угловой скорости ротора, выбором которой всегда можно обеспечить $\tilde{K} > 0$.

Предположив, что вокруг оси ротора и диска действует управляющий момент, был проведен анализ управляемости системы. Показано [3], что в системе с управлением имеются два интеграла, не зависящих от управления, которые позволяют понизить порядок системы, выделив управляемое подпространство.

Литература

1. *Лурье А.И.* Аналитическая механика / *А.И. Лурье.* – М.: Физматгиз., 1961.
2. *Лебедев Д.А.* Устойчивость и стабилизация неголономных систем, уравнения движения которых представлены в квазикоординатах: дисс. … к. физ.-мат. наук; на правах рукописи / Д.А. Лебедев. – М., 2008.
3. *Каленова В.И.* К вопросу об устойчивости стационарных движений неголономных систем Чаплыгина / В.И. Каленова, В.М. Морозов // GVV. – 2002. – Т. 66. – Вып. 2.

ЛАГРАНЖЕВО МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОН АККУМУЛЯЦИИ ИНЕРЦИОННОЙ ПРИМЕСИ В ПЛОСКИХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Н.А. Лебедева [1,2], *А.Н. Осипцов* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]МНИЦ Шлюмберже, Москва

Проведено исследование формирования различных структур в поле концентрации инерционной дисперсной примеси на фоне вихревого течения несущей фазы. Используется модель разреженной дисперсной среды, в которой массовая и объемная концентрации частиц малы и влиянием частиц на параметры несущего потока пренебрегается. Такая дисперсная среда крайне сжимаема: даже на фоне течений несжимаемой несущей фазы с неоднородным полем скорости, как правило, возникают области множественных пересечений траекторий частиц с образованием складок и сборок в дисперсном континууме. Эффективным инструментом для моделирования таких течений является комбинированный полностью лагранжев подход, развитый авторами в последние годы. Подход основан на сочетании бессеточного вихревого метода для нахождения параметров несущей фазы и полного лагранжева метода для расчета параметров дисперсной фазы. Применяемый в работе вариант вихревого метода для несущей фазы относится к классу методов, использующих диффузионную скорость завихренности. Этот метод хорошо развит для плоских и осесимметричных (без закрутки) течений вязкой жидкости. Полный лагранжев метод для моделирования движения инерционной примеси позволяет находить все параметры дисперсной фазы, включая концентрацию, вдоль лагранжевых траекторий, что дает возможность детально исследовать крайне неравномерные поля концентрации и градиента концентрации примеси.

В работе изучаются структуры зон аккумуляции дисперсной примеси в плоских и осесимметричных течениях вязкой и эффективно невязкой среды. Рассматриваются течения типа вихревых колец и вихревых пар, анализируются особенности, возникающие в поле концентрации инерционной примеси в зависимости от характерных параметров задачи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00057).

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СИГНАЛОВ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В КОЛЬЦЕВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ДВУХ ЩЕЛЕВЫХ СОПЛАХ

В.А. Левин [1,3], *Н.Е. Афонина* [1], *В.Г. Громов* [1], *И.С. Мануйлович* [1,3], *Г.Д. Смехов* [1], *А.Н. Хмелевский* [1,3], *В.В. Марков* [2,3]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва;
[3] ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

Исследование спектров сигналов пульсаций давления газа в кольцевых и линейных двух щелевых соплах с внутренним дефлектором представляет интерес для выяснения зависимости спектрального состава пульсаций от геометрических параметров сопел и условий течения в них с целью управления частотой процесса..

В работе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования зависимости частоты и амплитуды колебаний параметров течения в кольцевом и линейном двух щелевом соплах от условий на входе и выходе из сопла и его геометрии. Расчеты проведены с использованием химически неравновесной термохимической модели, включающей все основные продукты горения стехиометрической смеси ацетилена в воздухе: O, H, O_2, H_2, OH, CO, CO_2, HO_2, H_2O, N_2, 6 реакций диссоциации-рекомбинации и 13 обменных реакций.

Эксперименты с кольцевыми соплами выполнены в импульсном аэродинамическом стенде с использованием в качестве рабочего газа воздуха и продуктов сгорания ацетилено-воздушной смеси. В экспериментах стартовые возмущения давления на тяговой стенке после запуска сопла не затухали, а переходили в квазипериодический режим. Аналогичные режимы течений были получены и в расчетах, выполненных на основе уравнений Навье – Стокса для многокомпонентной реагирующей газовой среды. Предполагалось, что поверхность сопел химически нейтральна и имеет заданную температуру.

В результате проведенного исследования для базовой конфигурации кольцевого сопла экспериментально установлена основная доминирующая частота спектра (22 кгц), качественно подтвержденная расчетами (30 кгц). Численное исследование зависимости частоты и амплитуды колебаний параметров течения в указанных соплах показало, что управление основной доминирующей частотой наиболее эффективно может осуществляться как за счет пропорционального увеличения масштаба сопла (частота уменьшается пропорционально), так и размера критического сечения и высоты дефлектора, независимо от высоты полета – противодавления в пространстве истечения. Использование указанных регулировок позволило продемонстрировать возможность изменения основной доминирующей частоты пульсаций давления в исследованных соплах в пределах 7-30 кгц.

В расчетах впервые предсказано существование квазипериодических пульсирующих режимов течения газа в линейных двух щелевых соплах и определена основная доминирующая частота пульсаций (≈ 25 кгц) давления газа на тяговой стенке сопла.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА СТЕНКУ СФЕРИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ПРИ ГОРЕНИИ

В.А. Левин [1,2], *Н.Е. Афонина* [1], *Г.Д. Смехов* [1], *А.Н. Хмелевский* [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

Горение газов в замкнутом объеме сопровождается ростом давления. Скорость его подъема, конечная величина и полное время сгорания являются важными параметрами, описывающими динамику процесса сгорания. Экспериментальное исследование этих параметров в горючих смесях на базе метана представляет интерес для прогнозирования последствий случайных взрывов в процессе добычи и переработки углеводородного сырья – угля, нефти и газа.

В работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей изменения давления газа на стенку сферического реактора при горении в воздухе смесей метана, бинарных топлив метан-водород, метан-ацетилен и трехкомпонентного топлива метан-ацетилен-бутан. Исследования проводились в сферической камере сгорания с внутренним диаметром 286 мм. Горение смесей инициировалось в центре сферы взрывом проволочки из нихрома при разряде конденсаторной батареи емкостью 2 мкф за время около 5 мкс. Управление разрядом осуществлялось с помощью игнитронного разрядника. Энергия батареи при необходимости могла изменяться от 0,1 до 100 Дж. В экспериментах энергия инициирования горения составляла порядка нескольких джоулей при мощности источника порядка 10 Мвт/см^3. Первичными средствами измерений давления являлись как пьезоэлектрические датчики с временем разрешения порядка 2 мкс, так и тензометрические датчики, имеющие время разрешения порядка 1 мс. Датчики устанавливались в экваториальной плоскости сферы.

В результате проведенного исследования установлено.

1. Временные развертки сигналов давления разделяются на два характерных класса по виду кривой нарастания давления до максимума: с наличием и отсутствием явно выраженного излома на развертке. Сформулирован критерий появления характерного излома на записи развертки давления, получено соответствующее ему пороговое значение средней скорости распространения пламени.

2. Результаты измерений времен сгорания можно представить в безразмерных координатах. Получена универсальная экспериментальная кривая зависимости нормированного времени сгорания метано-воздушных смесей от значения числа А. Ле-Шателье ее состава. Она позволяет определить время сгорания смеси при сферическом распространении пламени в камерах произвольного радиуса.

3. Времена сгорания метано-воздушных смесей при введении в них углеводородных добавок сокращаются. По результатам измерений времен сгорания определены средние скорости распространения пламени в исследованных смесях.

4. В смесях (CH_4 - Воздух) измерены давления газа в сферической камере при полном сгорании и изменении концентрации метана в пределах $0 < [CH_4]\% < 9,43$. Максимальный рост исходного давления величиной в 6,8 раз наблюдался в стехиометрической смеси.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ: ПРИЗНАКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ВРЕМЯ ИНДУКЦИИ

В.А. Левин [1,2], *Н.Е. Афонина* [1], *Г.Д. Смехов* [1], *А.Н. Хмелевский* [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2] ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

К настоящему времени в НИИ механики МГУ проведено исследование процесса воспламенения водородно-кислородных смесей с использованием численного моделирования [1]. В итоге были определены для различных составов смесей температуры воспламенения и времена индукции. Применяемые при этом методики и соответствующие программы позволили перейти к аналогичному исследованию процесса воспламенения метано-воздушных смесей.

В работе [2] имеющиеся экспериментально измеренные значения времени индукции для различных смесей удалось представить в виде универсальной зависимости времени индукции от температуры для фиксированного (стандартного) состава смеси и давления. Состав включает: метан – 0,1, кислород – 0,2 и разбавитель (аргон) – 0,7 (отражены относительные мольные доли), давление газа 1 атм. В работе приведены показатели степени указанных величин для вычисления приведенного времени индукции из первичных данных.

Для проведения моделирования была использована база данных, приведенная в работе [3], содержащей константы скорости химических реакций протекающих при высоких температурах в метано-воздушных смесях. Расчеты проводились при заданных значениях температуры и давления реагирующего газа, в них вычислялись распределения концентраций компонентов во времени в диапазоне температур 700-2500 K. При воспламенении горючей смеси включается механизм цепного разветвления активных радикалов. В рассматриваемых смесях ими являются в первую очередь радикалы CH_3 и OH, участвующие в реакциях разветвления: $CH_3 + O_2 = CH_3O + O$ и $H + O_2 = OH + O$.

Расчеты показали, что в неравновесной области временных разверток возникают максимумы концентраций этих радикалов. При воспламенении концентрация горючего (метана) быстро уменьшается. Оказалось, что 1/10 доли метана в начальной смеси достигается в промежутке между максимумами концентраций радикалов CH_3 и OH (первый и второй по времени соответственно). Это время и считалось временем индукции воспламеняющейся метано-воздушной смеси. С уменьшением температуры время достижения 1/10 доли метана становится сначала больше времени достижения максимума концентрации радикала OH и далее вообще не достигается. Температуру, при которой это происходит, и более низкие температуры можно отнести к области не воспламенения рассматриваемой горючей смеси. Такое кардинальное изменение свойства воспламеняемости смеси происходит в интервале температур не более 50 K. В области не воспламенения максимумы концентраций радикалов CH_3 и OH остаются и исчезают при температурах 700-800 K.

Численное моделирование позволило установить эквивалентность методик вычисления приведенного времени индукции, представленных в [1, 2]. Значения времени индукции метано-воздушной смеси, вычисленные по этим методикам, совпадают при стандартных начальных параметрах смеси, а приведенные времена индукции при других параметрах в точности соответствуют универсальной зависимости в [2]. Близки к зависимости и приведенные времена достижения максимумов концентраций отмеченных радикалов, что свидетельствует в этом случае об их близости к времени индукции. В области не воспламенения расход метана происходит в режиме его медленного окисления, при этом приведенные времена максимумов концентраций радикалов заметно отличаются от представленных зависимостью значений.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

Литература

1. *Смехов Г.Д.* Исследование воспламенения водородно-кислородных смесей в диапазоне температур 700-2500 K / Г.Д. Смехов, О.П. Шаталов // ТВТ. – 2016. – Т. 54. – № 1.
2. *Заманский В.М.* Механизм и промотирование воспламенения перспективных топлив / В.М. Заманский, А.А. Борисов / Итоги науки и техники. Серия: Кинетика и катализ. – М.: ВИНИТИ, 1989. – Т. 19.
3. *Бочков М.В.* Химическая кинетика образования NO_x при горении метана в воздухе / М.В. Бочков, Л.А. Ловачев, Б.Н. Четверушкин // Матем. моделирование. – 1992. – Т. 4. – № 9.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ С УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ДОБАВКАМИ

В.А. Левин [1,2], *Н.Е. Афонина* [1], *Г.Д. Смехов* [1], *А.Н. Хмелевский* [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2] ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

Взрывоопасность работ по добыче и переработке угля, нефти и газа обусловлена рядом факторов, в числе которых одним из определяющих является превышение концентрационных пределов распространения (КПР) пламени. При этом основным горючим компонентом, содержащимся во взрывоопасной смеси, является метан, а содержание других дополнительных горючих компонентов может изменяться в зависимости от месторождения. Наличие углеводородов приводит к расширению диапазона взрывоопасных концентраций метано-воздушной смеси.

В работе представлены результаты экспериментального исследования КПР пламени в метано-воздушных смесях с добавками водорода, ацетилена и бутана, которые могут содержаться в составе рудничного газа. Экспериментальные исследования проводились в сферической камере сгорания. Все опыты выполнены при начальном атмосферном давлении, комнатной температуре и нормальной влажности воздуха. В экспериментах использовался метан высокой чистоты, содержащий не более 0,07 % примесей азота. Абсолютная точность приготовления компонентов смеси в исследуемом составе составляла по объемной концентрации 0,04 %. Горение смесей инициировалось в центре сферы взрывом проволочки. Основным измеряемым параметром являлось давление, регистрируемое в процессе распространения пламени датчиками, установленными в экваториальной плоскости на стенке сферической камеры сгорания. Считалось, что пламя сформировалось (был достигнут КПР пламени), если начальное давления в смеси после завершения горения возрастало на 5 % и более.

В результате проведенного исследования определены нижние концентрационные пределы распространения пламени для бинарных топлив метан-водород, метан-ацетилен и трехкомпонентного топлива метан-ацетилен-бутан. Значения КПР пламени, полученные в опытах, отличались от значений, предсказываемых правилом А. Ле-Шателье с различными наборами констант, в пределах 16 %. Представленные результаты могут использоваться для

оценки условий взрывобезопасности при работе с указанными горючими смесями, а также верификации и оптимизации расчетных моделей процесса распространения волн горения в многокомпонентных промышленных и рудничных пылегазовых смесях.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

О СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ДЕТОНАЦИИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

В.А. Левин [1,2], *Т.А. Журавская* [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

Используя детальный кинетический механизм химического взаимодействия, исследовано детонационное горение стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в плоский симметричный канал с сужением (пережатием). Исследования проводились с целью определения условий, обеспечивающих стабилизацию волны детонации, и выявления механизмов управления ее положением в потоке.

Определены условия, обеспечивающие формирование в канале с сужением создающего тягу течения со стабилизированной детонационной волной, инициируемой энергоподводом. Исследовано влияние изменений числа Маха входящего потока, запыленности поступающей в канал горючей смеси и размера выходного сечения на положение стабилизированной в потоке детонации. Предложены некоторые способы управления волной, позволяющие повышать эффективность детонационного сжигания газовой смеси.

Установлена возможность формирования в канале создающего тягу течения со стабилизированной детонационной волной без затрат энергии.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092). Исследования выполнены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова.

ВРАЩАЮЩАЯСЯ ДЕТОНАЦИЯ В ТЯГОВОМ МОДУЛЕ С КОЛЬЦЕВЫМ СОПЛОМ

В.А. Левин [1,2], *И.С. Мануйлович* [1,2], *В.В. Марков* [2,3]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва;
[3] ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

Сформулирована задача, моделирующая процесс инициирования и сгорания смеси в трехмерной детонационной волне, вращающейся около входа в кольцевое сопло тягового устройства с резонаторной полостью полусферической формы. Горючая смесь поступает в кольцевое сопло в виде однородного незакрученного потока, проходя через зазор между двумя параллельными плоскостями, перпендикулярными оси симметрии тягового устройства. Далее поток поступает в пространство, ограниченное сферической тяговой

стенкой, претерпевает разворот на 90^o и попадает в коническую выходную секцию с углом полураствора 45^o. Сформулирована модель инициирования детонации подводом энергии, и в последующих численных экспериментах выбраны необходимые для формирования вращающейся детонации параметры инициатора. Инициатор позволяет выбирать направление вращения. Система подачи смеси в камеру сгорания реализована с учетом соотношения давления в резервуаре и статического давления в камере сгорания на входе в нее. Проведен цикл расчетов, позволивший получить оптимальные значения параметров инициаторов вращающейся детонации. Установлено, что в камере сгорания формируется вращающаяся детонационная волна, направление вращения которой задается расположением зоны энерговыделения инициатора относительно твердой стенки, находящейся в плоскости, проходящей через ось симметрии, которая исчезает (сгорает) за определенное время. Получены и проанализированы нестационарные ударно-волновые структуры, возникающие в процессе формирования стационарной вращающейся детонации.

Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова, в оригинальном программном комплексе, разработанном для проведения многопараметрических расчетов и визуализации течений. Расчеты проведены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов».

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ЗАКАЧКЕ СУСПЕНЗИИ В ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ

Н.Е. Леонтьев, Е.И. Рощин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Предложена методика численного расчета одномерных течений суспензии в пористых средах с учетом образования подвижного сильного разрыва (скачка концентрации и, возможно, пористости). Течения такого вида встречаются в нефтепромысловых задачах (закачка воды в пласт, засорение прискважинной области буровым раствором), гидрогеологии (отток жидкости через дно водоемов с учетом кольматации) и в задачах природопользования (очистка загрязненных жидкостей).

Типичные лабораторные эксперименты, которые проводятся для изучения кинетики оседания взвешенных частиц на внутреннюю поверхность пористого скелета, организуются таким образом, что в опытном образце на первой стадии эксперимента возникает подвижный скачок, причем время его прихода к выходному сечению образца легко фиксируется. В связи с этим точное определение закона движения скачка представляет значительный интерес как диагностический признак.

Расчет проводится с использованием деформирующейся системы координат, вводимой таким образом, что положение скачка явно выделяется (shock-fitting method). Такой подход обладает рядом преимуществ по сравнению с часто используемыми методами сквозного счета, которые в ряде случаев дают трудно интерпретируемые и, вообще говоря, нефизичные (Куликовский, Погорелов, Семенов, 2001, с. 48) результаты из-за численного «размазывания» разрывов.

Методика применима для произвольного вида кинетического уравнения. Для начала расчета используется разложение решения задачи в степенные ряды по пространственной и временно́й переменным.

На основе сравнения с известными точными решениями со скачками пористости (Леонтьев, 2009) демонстрируется высокая точность расчета закона движения скачка и параметров течения за скачком. В дальнейшем планируется обобщение описанной методики на случай более сложных моделей с учетом рассогласования скоростей несущей жидкости и взвешенных частиц (Леонтьев, 2017).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 17-01-00037).

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КЕРАМИЧЕСКОМ ПОКРЫТИИ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

А.Р. Лепешкин [1], *Н.Г. Бычков* [1], *В.В. Назаров* [2]

[1]ФГУП ЦИАМ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В настоящее время проводятся работы по внедрению теплозащитных керамических покрытий (ТЗП) на рабочих лопатках газотурбинных авиационных двигателей (ГТД). При эксплуатации конструкции в покрытии образуются столбики и блоки от термической усталости. В одиночных столбиках и блоках возникает изгибающий момент. Приведены результаты расчетов напряжений в столбчатом керамическом покрытии рабочей лопатки ГТД с учетом воздействия газового потока и трения между потоком газа и поверхностью столбчатого керамического ТЗП.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00014).

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СТОЛБЧАТОМ ТЕПЛОЗАЩИТНОМ КЕРАМИЧЕСКОМ ПОКРЫТИИ ЛОПАТОК ГТД В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

А.Р. Лепешкин [1], *Н.Г. Бычков* [1], *В.В. Назаров* [2]

[1]ФГУП ЦИАМ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) новых поколений необходимо создание и улучшение защиты деталей высокотемпературного тракта ГТД с помощью теплозащитных покрытий (ТЗП). С этой целью на детали турбин авиационных ГТД наносят керамические ТЗП, столбчатая структура которых обладает лучшим сопротивлением термомеханической усталости по сравнению с плазменным покрытием. Под воздействием термоциклических нагрузок возникают термоусталостные трещины, которые приводят к образованию в столбчатом покрытии неоднородностей в виде одиночных столбиков. Под воздействием центробежных сил одиночные столбики и столбики в блоках покрытия подвергаются изгибу. На основе проведенных расчетных исследований с учетом конусности столбиков получены распределения напряжений в одиночных столбиках и столбиках в блоках керамического теплозащитного покрытия в поле центробежных сил. Из анализа указанного напряженного состояния получены ограничения по допустимой величине толщины керамического ТЗП лопатки турбины ГТД.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00014).

КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ СЛАБО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КЛЕТОК И ЖИДКОСТИ

С.А. Логвенков [1,2], *И.Н. Моисеева* [1], *А.А. Штейн* [1], *Е.Н. Юдина* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]НИУ ВШЭ, Москва

Представлена общая континуальная модель, описывающая активные реакции эмбриональных клеток, характерные для ранней стадии развития зародышей, с явным учетом активных деформаций и переупаковки клеток. Рассматривается сплошная трехфазная среда, образованная клетками, внеклеточной жидкостью и вспомогательной фазой, соответствующей системе протрузий, закрепляющихся на соседних клетках и обеспечивающих развитие активных напряжений, способных приводить к направленному движению клеток. В уравнениях баланса массы предполагается отсутствие клеточных делений и массообмена между клеточной и жидкой фазами. Среда деформируется из-за согласованного деформирования отдельных клеток и клеточных переупаковок, контролируемых механическими факторами. Переупаковки могут приводить к изменению размеров частицы среды. В клеточной деформации выделяются две составляющие – упругая, мгновенно сбрасываемая, если действующее на клетку усилие снимается, и неупругая (активная), определяемая активностью цитоскелета и перестройкой клеточных мембран. Предполагается, что скорость изменения тензора активной клеточной деформации зависит от напряжений в клеточной фазе и достигнутого уровня клеточных деформаций. Зависимость учитывает релаксацию активной деформации клеток и возвращение формы клеток к первоначальной после снятия внешней нагрузки и при отсутствии активных напряжений в среде. Определяющее уравнение для тензора активных напряжений учитывает механизм случайного возникновения на поверхности клетки протрузий, способных прикрепляться к местам адгезионных контактов, расположенных на поверхности соседних клеток, что приводит к возникновению активных напряжений во вспомогательной среде. При этом учитывается эффект нелокального взаимодействия: удаленные клетки, расположенные внутри некоторой области чувствительности, могут стимулировать развитие протрузий посредством выделяемых ими химических агентов. При описании процесса переупаковки клеток вводится внутренний параметр, учитывающий структуру среды и имеющий смысл тензора эффективных напряжений. Переупаковка клеток рассматривается как вязкое течение, управляемое тензором эффективных напряжений, в котором учитываются как активное воздействие со стороны вспомогательной фазы, так и межклеточное давление, определяемое упругостью клеток. На основании допущений о малости и медленности клеточных деформаций получена упрощенная модель. Проведен анализ дисперсионного уравнения, позволяющий выделить параметры и механизмы, влияющие на потерю устойчивости пространственно-однородного стационарного решения. Рассмотрены различные сценарии развития возмущений, приводящих к появлению новых структур.

Упрощенная модель используется при решении задачи о появлении полости в изначально однородном клеточном сфероиде. Это явление характерно для процесса бластуляции при эмбриональном развитии животных. Полученное решение позволяет проанализировать участие различных механизмов клеточных взаимодействий в процессе раннего формообразования и дает качественное совпадение с данными наблюдений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00504).

ОСАДКА СОСТАВНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

А.М. Локощенко

НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается осаживание составного цилиндра, состоящего из сплошного внутреннего цилиндра и окаймляющего его полого цилиндра, высоты обоих цилиндров совпадают. Установившаяся ползучесть обоих цилиндров описывается степенными соотношениями с одинаковыми значениями показателя степени и различными коэффициентами. Принимается, что оба цилиндра деформируются без бочкообразования, трение торцов цилиндров с плоскостями пресса описывается законом Кулона. Основной интерес представляет значение работы внешней сжимающей силы на перемещениях торцов цилиндра. Рассматривается осаживание составного цилиндра на одну и ту же величину за одну и ту же длительность с помощью различных программ нагружения. Рассмотрены кинематическая программа (при постоянной скорости сближения торцов цилиндра) и силовая программа (при постоянной внешней сжимающей силе). Показано, что по энергетическим затратам кинематическая программа осаживания эффективнее, чем силовая. С помощью вариационного подхода определена оптимальная программа осаживания, при которой работа внешней силы минимальна. Вычисления показали, что соответствующая работа внешней силы отличается от работы, затраченной при кинематической программе, на сотые и тысячные доли процента. Поэтому в технологических процессах осадки цилиндров целесообразно использовать кинематическую программу нагружения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00210).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ МЕМБРАНЫ ВНУТРИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСЛОВИЯХ

А.М. Локощенко [1], *Е.А. Абросимова* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]НИУ МАИ, Москва

Рассматривается задача о ползучести прямоугольной мембраны под действием постоянного поперечного давления q внутри П-образной жесткой матрицы. В качестве контактных условий рассмотрены случаи идеального скольжения, прилипания, а также скольжения с учетом трения по закону Амонтона – Кулона. Исследование проводится в четырех последовательных стадиях, включающих в себя как свободное деформирование, так и стесненное. На первой стадии (упругое деформирование) мембрана, плоская в начальном состоянии, под действием давления q мгновенно упруго деформируется, приобретая форму незамкнутой цилиндрической оболочки. На второй стадии мембрана свободно деформируется в условиях ползучести до момента касания стенок матрицы. Третья стадия заканчивается в момент касания мембраной поперечной стенки матрицы. На четвертой стадии мембрана контактирует с матрицей по поперечной и боковым сторонам до момента, когда радиус свободной части мембраны станет равным $\rho = 0,02a$, где a – половина ширины мембраны. Приведены решения задачи для различных случаев $b = 0,5,\ b = 2$, где b – отношение высоты матрицы к величине a.

Для описания деформирования мембраны при $t>0$ (t – время) предлагается степенная модель установившейся ползучести материала

$$\dot{p}_u=\frac{1}{t_0}\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_b}\right)^n,$$

где σ_u и $\dot{p}_u$ – интенсивности напряжений и скоростей деформаций ползучести соответственно, σ_b – предел кратковременной прочности материала при соответствующей температуре, t_0 и n – постоянные.

Получены зависимости $\bar{H}(\bar{t})$ и $\bar{\sigma}_u(\bar{t})$, где $\bar{H}=\frac{H}{H_0}$, $\bar{\sigma}_u=\frac{\sigma_u}{\sigma_b}$, $\bar{t}=\frac{t\sqrt{3}}{2t_0}$ (H и H_0 – толщины мембраны при $t=0$ и $t>0$).

Вычисления подтвердили предположение о соотношении времен окончания третьей и четвертой стадий для различных рассмотренных контактных условий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00210).

О ПРИМЕНЕНИИ ДРОБНО-ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ В ПЛАСТИНЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

А.М. Локощенко, Л.В. Фомин

НИИ механики МГУ, Москва

Исследуется длительное разрушение изгибаемой прямоугольной пластины при ползучести в условиях нестационарного сложного напряженного состояния с учетом влияния окружающей среды. С помощью кинетической теории Ю.Н. Работнова определено время до разрушения такой пластины при последовательном изгибе в различных плоскостях. Рассматриваются кусочно-постоянные зависимости уровня изгибающего момента от времени. Напряженно-деформированное состояние и время до разрушения пластины определяются при использовании дробно-линейной модели ползучести, которая в ряде случаев позволяет достаточно хорошо выразить скорость ползучести как функцию от напряжения в широком диапазоне напряжений. При напряжениях, близких к пределу прочности материала, скорость деформации ползучести существенно возрастает, и в рассматриваемые времена наступает разрушение. Таким образом, в указанном дробно-линейном соотношении предел прочности выполняет роль предельного напряжения. В отличие от наиболее распространенной степенной зависимости, в которой напряжение может выбираться сколь угодно большим, в данной сингулярной зависимости напряжение ограничено. Такое естественное ограничение является обоснованным с позиций физики и механики твердого тела. Влияние окружающей среды на ползучесть и длительную прочность пластины определяется диффузионным проникновением элементов окружающей среды в материал пластины. Для оценки скорости диффузионного процесса используется приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта. Учет влияния окружающей среды осуществляется с помощью введения в определяющие и кинетические дробно-линейные соотношения функции от интегрально средней концентрации агрессивной среды в материале пластины. Проведено сравнение времен до разрушения при использовании скалярного и векторного параметров поврежденности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00210).

АНАЛИЗ ВИБРОУСКОРЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ГРУНТА ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛНОЙ ПРЕГРАДЫ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Н.А. Локтева [1], *Н.А. Синодов* [2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]НИУ МАИ, Москва

Рассчитывается трехслойная пластина, помещенная в грунт. Для расчета используется декартова система координат *Oxyz*, по оси *Ox* пластина имеет длину l, по оси *Oy* пластина неограниченна. В качестве модели грунта используется однородная упругая изотропная среда. Для описания движения грунта используется замкнутая система уравнений, описывающая ее плоское движение, она включает в себя уравнения движения, соотношения Коши, физический закон, связывающий компоненты напряжения и деформации через параметры Ламе. Кроме того, используются эквивалентные уравнения в перемещениях (уравнения Ламе). Также перемещения выражаются через скалярные и векторные потенциалы.

Вдоль оси *Oz* из среды «1» на пластину действует волна амплитудой p и частотой ω, которая после прохождения преграды, индуцирует волну в среде «2». Поскольку занимаемая грунтом область неограниченна, то потенциалы решения уравнений должны удовлетворять условиям излучения Зоммерфельда для плоской задачи.

Основной задачей является определение виброускорений a_x, a_z и их модуля.

Математическая постановка заключается в задании набегающей волны, уравнений движения грунта и пластины, краевых условий для грунта и пластины, условия на бесконечности, а также условия контакта грунта с препятствием.

Движение пластины описывается системой уравнений В.Н. Паймушина. Полагается, что два несущих слоя являются упругими изотропными, а заполнитель – ортотропным сотовой конфигурации. На несущие слои действуют нормальные внешние давления. Граничные условия заданы в виде шарнирного опирания пластины.

Кинематические параметры пластины представлены в виде тригонометрических рядов, коэффициенты этих которых удовлетворяют условиям Зоммерфельда.

Раскладывая аналогичным образом деформации, напряжения, перемещения и потенциалы для упругой среды, получаем тангенциальные и нормальные перемещения грунта. Из условий контакта среды и пластины определяем константы.

На основании полученных значений констант определяются нормальные и касательные перемещения. Далее вычисляем виброускорения по *Ox, Oy* и *Oz*, а также модуль виброускорения.

ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ БЛОЧНОГО ЛУКА

А.А. Лужин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В отличие от классического лука график зависимости силы натяжения блочного лука от расстояния, на которое отведена тетива, представляет собой не монотонную кривую. Объяснению этого явления посвящена данная работа.

В ней рассматривается статическое равновесие блочного лука. Предложена двухпараметрическая модель для описания блока. Один из параметров отвечает

за соотношение смотки-размотки основной и вспомогательных тетив, второй – за соотношение натяжений в тетивах.

Проведено исследование влияния каждого из параметров на зависимость силы натяжения лука от расстояния, на которое отведена тетива. Показано, что причиной не монотонности зависимости силы натяжения лука от расстояния, на которое отведена тетива, является геометрически сложная форма блока, наличие же блоков цилиндрической формы не дает качественного отличия от лука классической схемы.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ С ВДУВОМ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПРОНИЦАЕМЫЕ СТЕНКИ

В.Г. Лущик, М.С. Макарова, А.Г. Здитовец

НИИ механики МГУ, Москва

Использование проницаемых поверхностей в ряде технических устройств является эффективным способом теплозащиты стенок от больших тепловых потоков при помощи вдува. Об актуальности проблемы теплозащиты стенок можно судить по большому числу публикаций по исследованию пограничного слоя на пластине с вдувом. Экспериментальных и расчетных работ по исследованию влияния вдува при течении в трубах значительно меньше.

В настоящей работе с использованием дифференциальной модели турбулентности проведено численное моделирование турбулентного течения в трубе и получены зависимости характеристик течения и теплообмена от интенсивности вдува охладителя через пористые стенки трубы. Показано, что коэффициенты трения и теплоотдачи уменьшаются с ростом интенсивности вдува.

Проведенное сравнение результатов расчета, отражающих основные особенности достаточно сложных процессов перестройки течения в трубе при вдуве газа, с известными экспериментальными данными в широком диапазоне чисел Рейнольдса, Прандтля и интенсивности вдува показало их удовлетворительное согласование. Это дает основание для проведения численного исследования с целью определения основных параметров, характеризующих эффективность теплообменных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00115) и Совета по грантам Президента РФ (№ МК-6025.2016.8).

ВЛИЯНИЕ ЛАМИНАРИЗАЦИИ ПОТОКА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С КОНФУЗОРОМ

В.Г. Лущик, М.С. Макарова, А.И. Решмин

НИИ Механики МГУ, Москва

Продольный градиент давления является параметром, который оказывает существенное влияние на турбулентное течение, приводя в пределе, в случае отрицательного градиента давления, к ламинаризации пограничного слоя.

Целью настоящей работы является численное исследование с использованием дифференциальной модели турбулентности течения с отрицательным градиентом

давления. Для решения задачи использовались уравнения неразрывности, движения и энергии в приближении узкого канала.

Рассмотрен плоский конфузор, в котором было реализовано течение с отрицательным градиентом давления. Входу в конфузор предшествовал участок стабилизации, на котором устанавливалось развитое турбулентное течение при заданном числе Рейнольдса. Далее следовал участок, на котором в плоском диффузоре при любом угле раскрытия число Рейнольдса оставалось постоянным. За диффузором следовал участок постоянного сечения, на котором устанавливалось развитое турбулентное течение при выходном числе Рейнольдса. По всей длине рабочего участка осуществлялся подогрев воздуха нагревателем с постоянным тепловым потоком в стенку.

Получены продольные распределения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи при изменении числа Рейнольдса и угла наклона стенок конфузора к оси канала. Показано, что безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) на выходе из конфузора значительно меньше числа Нуссельта для развитого турбулентного течения на входе в конфузор, что свидетельствует о ламинаризации течения. В выходном участке постоянного сечения за конфузором число Нуссельта продолжает уменьшаться, достигая минимума, а затем возрастает, достигая значения, соответствующего развитому турбулентному течению. Результаты численного исследования, проведенного для условий, соответствующих эксперименту, согласуются с известными экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00115) и Совета по грантам Президента РФ (№ МК-6025.2016.8).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА СИЛУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПО ЭЛАСТОМЕРУ

А.Н. Любичева [1], *П.А. Моссаковский* [2]

[1]ИПМех РАН, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Представленная работа продолжает исследование процессов индентирования твердой поверхности с регулярным рельефом в эластомер. Рассмотрен специальный случай индентирования с дополнительным условием вращения рельефной поверхности относительно поверхности эластомера. Задача решалась методом прямого компьютерного моделирования. Целью работы было сравнение осредненного коэффициента трения, задаваемого как отношение момента сил трения к произведению нормальной нагрузки и расстояния от области контакта до оси вращения, получаемого в расчете, эксперименте и в теории. Недеформируемая поверхность с регулярным рельефом моделировалась набором сферических выступов одинакового радиуса, расположенных по кругу. Их число варьировалось. Эластомер задавался в виде толстостенного кольца квадратного сечения. В расчете и эксперименте вертикальная нагрузка и вращение прикладывались к твердой поверхности рельефа. Эластомер закреплялся по основанию по всем степеням свободы. В качестве модели материала для эластомера используется ранее верифицированная обобщенная модель Максвелла с одним или двумя временами релаксации (модель «Prony series»).

Показано, что зависимости осредненных коэффициентов трения от времени, полученные в расчетах, имеют немонотонный, циклический характер с переходом на установившейся режим. Установлена хорошая корреляция между осредненными по периоду и амплитудными значениями этих величин с получаемыми в эксперименте и в теории.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-29-00198).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ИЗОГНУТОМ КАНАЛЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

И.С. Мануйлович [1,2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2] ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, Моск. обл.

Рассмотрена задача об инициировании детонации в сверхзвуковом потоке стехиометрической пропановоздушной смеси в трехмерном канале круглого сечения постоянной ширины с изгибом. В зоне изгиба стенка канала имеет форму тора. Длина торообразной секции определяется заданным углом поворота канала. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова, в оригинальном программном комплексе, разработанном для проведения многопараметрических расчетов и визуализации течений. Расчеты проведены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов». Инициирование детонации происходит в результате формирования в канале ударно-волновых конфигураций, связанных с поворотом потока. Получены нестационарные картины течения и исследована их зависимость от параметров задачи – скорости набегающего потока, угла поворота канала, его ширины и радиусов кривизны стенок. Построена карта режимов течения в плоскости скорость-угол поворота канала. Получен режим течения без детонации, режим с детонационной волной, выходящей из канала через входное сечение, и режим со стационарной детонацией. Полученные результаты качественно согласуются с выводами, полученными в аналогичной плоской задаче о детонации в канале с изгибом.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.), Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

ОПИСАНИЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЯЗКОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА ПРИ КРУЧЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМЕЙСТВА ОБЪЕКТИВНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГОРДОНА – ШОУОЛТЕРА

Е.Д. Мартынова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Одним из способов построения определяющих соотношений (ОС) вязкоупругих сред при конечных деформациях является обобщение соответствующих моделей, пригодных для малых деформаций и замена в них производных по времени какими-либо объективными производными. В настоящей работе используется ОС, основанное на элементарной модели Максвелла. В качестве объективной производной взято однопараметрическое семейство производных Гордона – Шоуолтера. Указанное ОС применено при рассмотрении кручения несжимаемого вязкоупругого цилиндра неизменной длины. В предположении, что скорость изменения крутки постоянна, получено аналитическое решение задачи, на основании которого затем найдены решения для одно- и двухступенчатых процессов деформации. Показано, что использованная модель позволяет описать эффект Пойнтинга, а также экспериментально наблюдаемый факт, что при двухступенчатом нагружении, для которого крутка на втором этапе в два раза меньше, чем на первом, продольная сжимающая сила на втором этапе не зависит от длительности первого. Построенные на основании полученного решения графики

зависимости продольной силы и крутящего момента от сдвиговой деформации демонстрируют зависимость полученных кривых от скорости изменения крутки, что также согласуется с экспериментальными данными. Для каждого значения параметра a, входящего в объективную производную, найдена область изменения крутки $\kappa(t)$, зависящая от a и радиуса цилиндра, в пределах которой напряжения монотонно меняются со временем при постоянной скорости изменения $\kappa(t)$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00669).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С ВНУТРЕННИМ СУХИМ ТРЕНИЕМ

Е.Д. Мартынова, А.В. Муравлев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В данной работе предлагается дальнейшее развитие экспериментально-теоретической методики определения сдвиговых свойств линейно вязкоупругого материала из опыта на затухающие крутильные колебания сплошного цилиндрического вязкоупругого стержня кругового поперечного сечения. Дальнейшее развитие указанной методики состоит в дополнительной возможности учета сухого внутреннего трения в вязкоупругом материале. В эксперименте верхний конец вертикально висящего стержня закреплен, к нижнему концу стержня перпендикулярно его оси прикреплена планка, висящая горизонтально. В начале эксперимента эта планка поворачивается в горизонтальной плоскости вокруг оси стержня на угол $\varphi(0)$ и удерживается некоторое время в таком положении, после чего планка отпускается, начинаются затухающие крутильные колебания вязкоупругого стержня. Уравнение вращения планки получено из условия равенства по абсолютной величине крутящих моментов, действующих на планку и на вязкоупругий стержень с внутренним сухим трением. В предлагаемой методике предполагается, что для рассматриваемого материала связь напряжений и деформаций задается соотношением, полученным добавлением отвечающей за сухое внутреннее трение константы τ_s в виде слагаемого к интегральному соотношению Больцмана – Вольтерры с ядром сдвиговой релаксации $R(t)$. С использованием этого предположения получено интегро-дифференциальное уравнение по времени t для угла поворота планки $\varphi(t)$. Это уравнение может быть решено с помощью интегрального преобразования Лапласа. Решение $\varphi(t)$ этого уравнения имеет вид, соответствующий затухающим крутильным колебаниям стержня из линейно вязкоупругого материала с внутренним сухим трением, описывающегося трехконстантной моделью Максвелла с добавленным элементом сухого трения. Параметры, входящие в найденное решение, определяются из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных данных для угла закручивания планки как функции времени, после чего полученная функция $\varphi(t)$ подставляется в уравнение крутильных колебаний планки, из которого затем находятся константы E_0, E_1, α_1, входящие в ядро $R(t)$, а также величина τ_s сухого трения.

Предложенная экспериментальная методика применима к обработке экспериментальных данных по крутильным колебаниям сплошного стержня кругового поперечного сечения из намагничивающегося эластомера (силикон с частицами ферромагнетика), в том числе и при воздействии электромагнитного поля, приводящем к появлению новых эффектов – например, к остановке колебаний при значении угла φ, отличном от нуля. Данный эффект может быть описан благодаря наличию в используемых

определяющих соотношениях слагаемого τ_s ,отвечающего за внутреннее сухое трение. Применение трехконстантной модели Максвелла для описания вязких свойств обусловлено невозможностью удовлетворения нулевым начальным условиям для скорости изменения угла $\varphi(t)$ при использовании элементарных двухконстантных моделей вязкоупругости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00669; 16-51-12024; 15-08-04281).

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В АТМОСФЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

С.А. Маслов

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Вейвлет-анализ – одна из наиболее популярных методик современной науки и техники. Методы вейвлет-анализа позволяют локализовать частотно-временные закономерности физических процессов, в то время как многие другие методики (в частности, преобразование Фурье) дают возможность исследовать лишь частотные характеристики процессов. В настоящей работе вейвлет-анализ применяется к сравнительному исследованию процессов разной природы с резкими скачками физических параметров: интенсивных атмосферных вихрей – тайфунов (тропических ураганов) и торнадо (смерчей) – и плазменных процессов. Для анализа используется вейвлет Хаара, применение которого эффективно в ходе исследования как атмосферных вихрей, так и плазменных процессов в экспериментальных установках.

Проведено сравнение частотно-временной эволюции давления в торнадо (Манчестер, 24 июня 2003 г., Южная Дакота, США) и тайфуне Айрин (15-29 августа 2011 г., США). Продолжительность торнадо не превышала 4 мин, а ураган Айрин в Южной Каролине (США) длился 2 суток (26-27 августа 2011 г.). Несмотря на меньшее время жизни и меньший поперечный размер торнадо в сравнении с тайфуном, перепады давления вблизи торнадо гораздо больше вследствие большей скорости вращения. Абсолютное изменение давления в торнадо достигало 100 мбар, а в тайфуне не превосходило 50 мбар. Частота флуктуаций давления составляла 10^{-2} $с^{-1}$ в торнадо и 10^{-5} $с^{-1}$ в тайфуне, что обусловлено большим радиусом последнего. Вейвлет-анализ показывает, что амплитуда флуктуаций давления в атмосферных вихрях обоих типов достигает максимума в те моменты, когда само давление минимально: на 90-й с в торнадо и в районе 12:00 27 августа 2011 г. в тайфуне. Продолжительность скачка давления в торнадо и тайфуне имела порядок 5 с и нескольких часов соответственно. Флуктуации давления более высоких частот усиливаются ближе к оси вихря, чем низкочастотные колебания.

Плазменные процессы с резкими скачками характеристик существенно отличаются от атмосферных вихрей: При характерной продолжительности 10-100 мс частота флуктуаций имеет порядок 10^5 $с^{-1}$, а длительность скачка параметров – около 0,1 мс. Колебания в плазме при изменении режима течения затухают синхронно: не наблюдается существенной зависимости скорости затухания от частоты.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 16-31-00456 мол_а).

О МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ МАЛОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ РОТОРА САВОНИУСА

А.А. Мастерова

НИИ механики МГУ, Москва

С момента изобретения ротора Савониуса появилось множество работ, посвященных его изучению. Большинство таких работ содержат результаты экспериментальных исследований либо представляют собой численное моделирование динамики ротора. Однако, несмотря на многочисленные исследования в данной области и непосредственное практическое применение ветроустановок с ротором Савониуса, конструктивная теория функционирования замкнутой системы для установок рассматриваемого типа в научной литературе отсутствует. Поэтому существует потребность в разработке достаточно простой механико-математической модели ветроэнергетической установки, с помощью которой можно было бы изучать влияние тех или иных параметров на рабочие характеристики ветроустановки.

В настоящей работе предложена модель малогабаритной ветроэнергетической установки, ветроприемный элемент которой представляет собой ротор Савониуса. Рассматривается подход к описанию структуры крутящего момента на базе имеющихся экспериментальных данных. Выписаны динамические уравнения системы, включающей в себя как ветроприемный механизм, так и генератор. Проведен параметрический анализ положений равновесия, стационарных режимов и исследована их устойчивость. Проведено численное моделирование динамики ветроустановки с использованием предложенной модели.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-06970; 17-08-01366; 16-31-00374).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Д.И. Меркулов, А.В. Муравлев, В.А. Налетова, Д.А. Пелевина, В.А. Турков

НИИ механики МГУ, Москва

В данной работе предложена методика экспериментального определения вязкоупругих свойств намагничивающихся эластомеров (НЭ) – композиционных материалов, состоящих из эластомера и ферромагнитных частиц, – и исследовано влияние на них однородного магнитного поля.

В эксперименте цилиндрический образец из НЭ подвешивался вдоль оси катушек Гельмгольца. Свободный нижний конец тела скреплялся с центром стержня с известным моментом инерции, который закручивался на некоторый начальный угол. Далее производилась видеосъемка затухающих колебаний стержня с последующей раскадровкой и построением графика зависимости угла от времени.

При анализе графиков были обнаружены остаточные деформации, возрастающие с увеличением приложенного магнитного поля. При выключении магнитного поля остаточные деформации уменьшались до некоторого характерного значения. Построена математическая модель, являющаяся обобщением модели Кельвина – Фойгта и учитывающая некоторое внутреннее сухое трение в НЭ, по предположению являющееся причиной остаточных деформаций. Из сравнения теории и эксперимента определены

коэффициенты упругости и вязкости в этой модели. Показано, что эти коэффициенты зависят от величины магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-51-12024).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ КЛИНА

Е.В. Михальченко [1,2], *Л.И. Стамов* [1,2], *Б.П. Рыбакин* [1,2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;
[2] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Такие явления как горение и детонация, а также процессы перехода одного режима в другой, играют важную роль, например, при конструировании новых типов двигателей, основанных на детонационном сжигании топлива, при повышении эффективности существующих двигателей, при решении проблем безопасности, связанных с транспортировкой и хранением различных топлив и т.д. Одним из наиболее быстрых и относительно дешевых способов решения такого рода задач является компьютерное моделирование. Для этого в настоящее время широко используют гибридные вычислительные системы, снабженные специализированными сопроцессорами. Это позволяет значительно сократить время проведения расчетов.

В работе была рассмотрена задача инициирования детонации путем отражения и фокусировки ударной волны от клинообразной поверхности в трехмерной постановке. Для этого рассматривалась цилиндрическая труба, заполненная стехиометрической водородно-воздушной смесью. В одном из концов трубы устанавливалась клиновидная полость с углом при вершине 900. С противоположного конца трубы в начальный момент времени задавалась ударная волна определенной интенсивности, падающая на установленную вставку. Для численного моделирования данной задачи было рассмотрено несколько численных методов высокого порядка точности. В качестве основного был выбран метод, основанный на центральной полудискретной схеме Курганова и Леви. Использовалась модернизированная кинетика горения водородно-воздушной смеси Мааса и Поупа, состоящая из 20 обратимых реакций и 9 компонент (азот выступает в качестве девятой, нейтральной компоненты). Решение рассматриваемой системы жестких дифференциальных уравнений химической кинетики осуществлялось четырех стадийным методом типа Розенброка. Моделирование осуществлялось на вычислительной системе с несколькими многоядерными центральными процессорами. Вычисления на центральных процессорах осуществлялись с помощью технологии параллельного программирования OpenMP.

Было проведено сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными, полученными в ударной трубе. Проведено сравнение с теоретическими данными распространения детонационной волны в химически реагирующей газовой смеси. В зависимости от интенсивности падающей ударной волны выделено несколько режимов развития процессов после отражения от клина.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-07-00549).

РАЗВИТИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Е.И. Могилевский

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Выбор преимущественно развивающейся моды неустойчивости стекающей пленки вязкой жидкости может осуществляться за счет внешних периодических воздействий. В частности, если жидкость является проводником и находится в нормальном переменном электрическом поле, то механические напряжения на свободной поверхности периодически меняются, что может проводить к развитию неустойчивости за счет параметрического резонанса.

Для моделирования нелинейной волновой динамики используются модифицированные уравнения Шкадова для интегральных характеристик. Рассматривается эволюция малых возмущений, у которых фиксирован либо пространственный, либо временной период. В первом случае решение ищется в виде отрезка ряда Фурье. Во втором – используется метод конечных разностей и решается нестационарная задача на протяженном промежутке, длина которого многократно превосходит характерную длину волны возмущений. Задаются малые возмущения фиксированной частоты во входном сечении.

Показано, что если возмущение является неустойчивым при эффективном значении постоянного поля, то наличие переменного возбуждения не приводит к качественным изменениям, однако формируется двоякопериодическая структура. Если параметры возмущения таковы, что первая гармоника возбуждается за счет параметрического резонанса, то наблюдается слабонелинейная волна, в которой амплитуда гармоник монотонно падает с ростом номера. Если же параметрически возбуждается вторая гармоника в спектре сформировавшейся волны, только она имеет отличную от нуля составляющую. Таким образом, продемонстрирована возможность получения чистых гармонических волн в нелинейной системе.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ № МК-1798.2017.1).

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ УПРУГИХ СВОЙСТВ РОГОВИЦЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КЛИНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.Н. Моисеева, А.А. Штейн

НИИ механики МГУ, Москва

Работа продолжает цикл исследований по моделированию процедур, применяемых в офтальмологии и включающих механическое нагружение. Целью ее является оценка влияния неоднородности упругих свойств роговицы на результаты тонометрии по Маклакову (нагружение роговицы глаза плоским широким штампом) и процесс принудительного изменения объема глазного яблока (инъекции). Для исследования использован разработанный нами ранее для роговицы с однородными механическими свойствами подход, основанный на представлении роговицы безмоментной линейно упругой поверхностью, а склеральной области упругим резервуаром, откликающимся изменением объема на изменение давления. В рамках принятой модели упругое поведение склеральной области характеризуется константой, отвечающей за ее упругие свойства,

а роговицы – функциональной зависимостью параметра, отвечающего за жесткость, от положения на ее поверхности.

Проведены численные расчеты значений тонометрического давления при нагружении по Маклакову для случаев неоднородности упругих свойств роговицы, соответствующих естественному ужесточению в области, примыкающей к склере, искусственному ослаблению жесткости на значительном участке апикальной зоны (моделирование результатов оперативного вмешательства), а также патологиям роговицы, при которых ослаблена кольцевая зона вблизи контакта со склерой. Для всех случаев неоднородности численно исследовался также процесс изменения внутриглазного объема в зависимости от внутреннего давления в отсутствии груза.

Результаты расчетов показали, что основным фактором, через который неоднородность роговицы влияет на результаты тонометрии по Маклакову и объемное растяжение глазного яблока, является среднее значение эффективной жесткости роговицы. При искусственном ослаблении жесткости роговицы в апикальной области результаты тонометрии по Маклакову оказываются незначительно завышенными, однако возможно заметное изменение коэффициента объемного растяжения по сравнению со случаем интактной роговицы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00380).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЦИЛИНДРАМИ

А.А. Монахов

НИИ механики МГУ, Москва

Исследуется течение жидкости в тонком зазоре между эксцентрическими цилиндрами, вложенными один в другой с параллельными осями. Движение жидкости задается вращением границ цилиндров. Числа Рейнольдса не превышают 1. Такие условия часто встречаются в слое смазки. Показано, что при вращении только внешнего цилиндра, в областях, прилегающих к минимальному зазору, возникают возвратные течения. Перед линией минимального зазора происходит поджатие потока с возрастанием давления, и часть жидкости вдоль внутреннего цилиндра возвращается обратно. За линией минимального зазора возвратное течение обусловлено локальным падением давления вследствие расширения потока и стремлением жидкости занять эту область. Показано, что падение давления зависит от величины зазора между цилиндрами и скорости взаимного перемещения. Уменьшение давления до давления растворенных газов в жидкости приводит к возникновению газовой кавитации в виде дискретных пузырьков вдоль образующей на внутреннем цилиндре.

Установлено влияние диаметра внутреннего цилиндра на положение точки минимального давления и форму кавитационных пузырьков. С ростом диаметра внутреннего цилиндра, кавитационные пузырьки остаются дискретными, но возрастает их размер, как вдоль образующей внутреннего цилиндра, так и в направлении потока. Установлено, что кавитационные пузырьки прикреплены к внутренней стенке цилиндра и их носовая часть является более острой, чем кормовая. Возможно, это связано с увеличением толщины слоя жидкости после выполнения кавитационного условия, согласно которому локальное давление в жидкости должно быть меньше давления растворенных газов.

При вращении внутреннего цилиндра в противоположную сторону от вращения внешнего цилиндра происходит смена областей низкого и высокого давления. На месте

падения давления, за линией минимального зазора, возникает область повышения давления и кавитация здесь не возникает. Кавитация возникает перед линией минимального зазора, где до этого было повышение давления, но вследствие растяжения жидкости от вращения цилиндров в разные стороны происходит смена знака давления.

Полученные результаты внесут новый вклад в дальнейшее развитие физической модели кавитации в узких зазорах.

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКЕ

В.М. Морозов, В.И. Каленова

НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается ряд нестационарных задач управления космической динамики: управление движением космического аппарата (КА) в окрестности точек либрации ограниченной круговой задачи трех тел с использованием сил светового давления; управление ориентацией искусственного спутника Земли (ИСЗ), движущегося по круговой орбите, при помощи магнитных моментов; определение ориентации ИСЗ по информации, поступающей от солнечного датчика и магнетометра. Во всех задачах общей является математическая модель, описывающая эти задачи. Линеаризованная модель представляет собой линейную нестационарную систему, содержащую управление и наблюдение, которая допускает конструктивное преобразование в полностью стационарную систему большего порядка. Это позволяет использовать разработанную авторами методику исследования приводимых нестационарных систем. В указанных задачах проведены преобразования к стационарным системам, на основе полученных стационарных систем исследованы управляемость и наблюдаемость, разработаны оптимальные алгоритмы управления и оценивания. Подробно рассмотрена представляющая особый интерес задача стабилизации КА в окрестности коллинеарной точки либрации системы Земля – Луна – КА, находящейся «за Луной». Эффективность предлагаемой методики подтверждена математическим моделированием.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО МЕТОДУ КОЛЬСКОГО. ЗАДАЧА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

П.А. Моссаковский, Л.А. Костырева, А.В. Инюхин, Т.А. Белякова, А.П. Беляев

НИИ механики МГУ, Москва

Одним из требований, предъявляемым к научным подразделениям МГУ, является эффективное использование в научно-исследовательской работе и учебном процессе нового экспериментального оборудования, приобретенного в рамках ПНР. Новый экспериментальный комплекс НИИ механики МГУ, включающий установку для изучения динамического поведения материалов по методу Кольского с разрезным стержнем Гопкинсона и высокоскоростную систему визуализации деформаций, служит для исследования механических свойств материалов различной природы в условиях высокоскоростного нагружения и повышенных температур. В нем реализована наиболее прогрессивная на сегодняшний день схема предварительного разогрева испытуемых образцов в удаленной от оси мерных стержней нагревательной печи с автоматизированной

системой управления всеми этапами эксперимента. Она позволяет получать в образцах существенно более высокие температуры, чем при использовании стандартных схем. Для ознакомления студентов механико-математического и родственных факультетов с работой на современном экспериментальном оборудовании и использования новых экспериментально-вычислительных методов в учебный план включена задача специального студенческого практикума «Экспериментальное исследование динамических свойств материалов по методу Кольского» и разработано соответствующее учебное пособие. В докладе рассмотрены все основные этапы задачи, включающие теоретическую часть, калибровку экспериментальной установки, собственно эксперимент и обработку результатов. Важным этапом работы является ознакомление студентов с результатами компьютерного моделирования проведенного эксперимента на виртуальном стенде, сравнение и анализ полученных результатов.

О СООТВЕТСТВИИ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭЛАСТИЧНОЙ ВУЛКАНИЗИРОВАННОЙ РЕЗИНЫ НЕКОТОРЫМ УПРУГИМ ПОТЕНЦИАЛАМ

А.В. Муравлев, М.А. Степина

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Представление упругого потенциала $W = W\left(I_1(\mathbf{C}), I_2(\mathbf{C})\right)$ в виде функции от первого $I_1(\mathbf{C}) = \mathrm{tr}\,\mathbf{C}$ и второго $I_2(\mathbf{C}) = (I_1^{\,2}(\mathbf{C}) - I_1(\mathbf{C}^2))/2$ инвариантов меры конечных деформаций Коши – Грина C является наиболее распространенной формой задания этого потенциала для изотропных несжимаемых гиперупругих материалов (при этом $I_3(\mathbf{C}) = \det(\mathbf{C}) = \mathbf{1}$). Частными случаями такого представления упругого потенциала W, используемыми на практике, являются: неогуков потенциал Трелоара $W_1 = G\left(I_1(\mathbf{C}) - 3\right)$, потенциал Муни $W_2 = \mathbf{C}_1\left(I_1(\mathbf{C}) - 3\right) + \mathbf{C}_2\left(I_2(\mathbf{C}) - 3\right)$, а также потенциал Бидермана $W_3 = W_2 - \mathbf{C}_3\left(I_1(\mathbf{C}) - 3\right)^2 + \mathbf{C}_4\left(I_1(\mathbf{C}) - 3\right)^3$. Для построения упругого потенциала конкретного материала необходимы экспериментальные диаграммы деформирования этого упругого изотропного материала при конечных деформациях, в частности – диаграммы растяжения, сжатия и чистого сдвига. Базовыми экспериментами для получения таких диаграмм являются: опыт на одноосное растяжение образца, опыт на одноосное сжатие (осадка цилиндрического образца или раздувание внутренним давлением тонкостенной сферической оболочки, соответствующее двухосному растяжению) и опыт на поперечное растяжение тонкой узкой прямоугольной полосы с защемленными длинными сторонами. В данной работе проведен анализ соответствия указанным выше трем упругим потенциалам диаграмм деформирования высокоэластичной вулканизированной резины, которые были получены Трелоаром в опытах на одноосное растяжение, двухосное растяжение и чистый сдвиг. В этом анализе использовались полученное Трелоаром значение модуля сдвига $G = 4\,\text{кГ/см}^2$ и полученные Бидерманом значения констант $C_1 = 3{,}8\,\text{кГ/см}^2$, $C_2 = 0{,}2\,\text{кГ/см}^2$, $C_3 = 0{,}076\,\text{кГ/см}^2$, $C_4 = 0{,}00368\,\text{кГ/см}^2$, позволяющие наиболее точно описать указанные выше эксперименты. Проведенный анализ показал, что ни один из трех рассмотренных упругих потенциалов не позволяет описать с одинаково приемлемой точностью диаграммы растяжения, сжатия и чистого сдвига вплоть до максимальных значений деформаций, достигнутых в этих экспериментах. Самый сложный из трех рассмотренных потенциалов – потенциал Бидермана – описывает диаграммы

растяжения и чистого сдвига с приемлемой точностью и значительно лучше двух других потенциалов. Самый простой из этих трех потенциалов – потенциал Трелоара – описывает участок диаграммы сжатия вплоть до 10-кратной степени сжатия с приемлемой точностью и значительно лучше двух других потенциалов. При этом участок диаграммы сжатия от 10-кратной до 20-кратной степени сжатия не описывается с приемлемой точностью ни одним из трех рассмотренных потенциалов. Это означает, что добавление дополнительных степенных слагаемых в упругий потенциал не позволяет улучшать описание всех диаграмм деформирования одновременно – одни диаграммы начинают описываться лучше, а другие – хуже. В связи с этим представляют интерес для исследования другие формы задания потенциала для изотропных несжимаемых гиперупругих материалов, например представление упругого потенциала $W = W(h_u, \psi)$ в виде функции от интенсивности h_u и угла ψ вида деформированного состояния, являющихся соответственно вторым и третьим инвариантами тензора логарифмических деформаций Генки **H** (при этом первый инвариант $I_1(\mathbf{H}) = \mathrm{tr}(\mathbf{H}) = 0$). По углу ψ эффективной является тригонометрическая аппроксимация в области определения W (сектор $0 \le \psi \le \pi/3$ с углом раствора 60° в двухмерном пространстве деформаций).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00669; 16-51-12024; 15-08-04281).

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ5 И ВТ6 ПРИ ОДИНАКОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 650 °С

В.В. Назаров

НИИ механики МГУ, Москва

Приведены механические характеристики ползучести титановых сплавов ВТ5 и ВТ6 ($T = 650\,^\circ\mathrm{C}$). Из анализа сравнения механических характеристик этих титановых сплавов установлено, что титановый сплав ВТ5 может быть рекомендован в качестве конструкционного материала для кратковременной работы при $T = 650\,^\circ\mathrm{C}$ в режиме не циклически изменяющихся во времени растягивающих внешних усилий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-08-00014; 17-08-01218).

ДЕГАЗАЦИОННАЯ ПРИРОДА СВЕТОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОБЛАЧНЫХ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ

В.Л. Натяганов [1], *А.Н. Скибицкий* [1], *С.А. Шопин* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]ТулГУ, г. Тула

Дегазационно-электромагнитная природа световых предвестников землетрясений (ПЗТ) была впервые теоретически обоснована в работах В.Л. Натяганова на основе эффекта гигантского комбинационного рассеяния света на микроаэрозольных частицах, взвешенных в дегазационных струях.

Многообразие геометрических форм наблюдаемых световых ПЗТ стимулировало поиск подходящих классов ламинарных и турбулентных течений идеальной и вязкой жидкостей, геометрические границы которых соответствовали бы наблюдаемым формам световых ПЗТ. С разной степенью подробностей были разработаны гидроэлектромагнитные модели для световых ПЗТ разных геометрических форм типа плоских слоев, цилиндрических столбов, наземных полусфер, атмосферных шаров и тороидов, парашютообразных конусов.

На основе МГД-уравнений в приближении пограничного слоя для плоских затопленных струй рассмотрена дегазационная модель формирования линейных облачных сейсмотектонических индикаторов (ОСТИ) над протяженными подводными литосферными разломами. Задача при этом распадается на две части: подводную и надводную. Для подводной части считается, что электропроводность морской воды линейно связана с продольной скоростью в зоне затопленной дегазационной струи. При выходе струи в атмосферу проводимость считается постоянной и рассматривается схема типа струйного течения из сопла конечной широты при наличии спутного потока с морской поверхности.

При выполнении ряда дополнительных условий (уровня интенсивности исходной затопленной струи; наличия и типа всплывающих дегазационных пузырьков с налипшими микрочастицами, которые в атмосфере могут служить дополнительными центрами конденсации; необходимой концентрации гидратированных кластерных ионов и т.д.) атмосферная струя может достигнуть высот с температурой точки росы, где и начнется процесс конденсации. При ясном небе это приводит к образованию линейных ОСТИ, а при сильной облачности могут возникать ОСТИ в виде щелей ясного неба типа провалов в облачности. По эмпирической схеме краткосрочного прогноза ОСТИ являются наиболее информативными ПЗТ, которые позволяют локализовать место и рассчитать потенциальную магнитуду готовящихся землетрясений.

Полученные теоретические формулы и выводы сравниваются с результатами прямого численного моделирования водородной дегазации из наземных литосферных разломов на основе системы уравнений Эйлера и конвективной диффузии, выполненных в ходе работ по госконтракту Минобрнауки (№ 14.577.21.0109, УИП RFMEFI57714X0109).

ВОЛНОВОДНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАКАЧКИ ЗЕМНЫХ НЕДР КАК ТРИГГЕР ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВУЛКАНИЗМА

В.Л. Натяганов [1], *Ю.Д. Скобенникова* [1], *И.В. Степанов* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]Географический факультет МГУ, Москва

По эмпирической схеме краткосрочного прогноза триггером коровых землетрясений вдоль границ литосферных плит (литосферных разломов) обычно являются резкие геомагнитные возмущения от геоэффективных явлений на Солнце типа вспышек или корональных выбросов массы.

Внутри литосферных разломов среда является гетерогенной с повышенной долей глубинных флюидов (вода, пар, различные газы) и характеризуется другими физико-химическими свойствами по сравнению с монолитными бортами литосферных плит.

В результате повышенной диэлектрической проницаемости и проводимости литосферные разломы представляют собой своеобразные диэлектрические волноводы, так как могут эффективно и в более широком диапазоне поглощать энергию электромагнитных волн при резком усилении солнечной активности.

Подобная электромагнитная накачка вызывает многочисленные электротепловые пробои во флюидных мезополостях по глубине литосферных разломов, что сопровождается генерацией водорода (в молекулярной, атомарной и протонной формах) и снижает прочность на сдвиговые усилия, т.е. фактически является триггером землетрясений вдоль активированных границ литосферных плит, где был достигнут предсбросовый уровень накопившихся тектонических напряжений.

Аналогичным образом подобная накачка земных недр может осуществляться по старым подводящим магматическим каналам и трещинам, провоцируя часто неожиданное начало новых вулканических извержений. Медленно остывающая лава в таких старых каналах часто представляет собой своеобразную силикатную пену с объемной концентрацией флюидно-газовых пузырей до 0,8. В локальных скоплениях такой пены при электротепловых пробоях этих пузырей могут возникать сходящиеся ударные волны и пиковые скачки *p*-*T*-условий с генерацией протонов и тепловых нейтронов, что приводит к интегральному повышению критических *p*-*T*-условий в магматической системе и в ряде случаев может служить триггером вулканических извержений. В качестве характерных примеров в докладе приводится Большое трещинное извержение (1975) и неожиданное пробуждение вулкана Плоский Толбачик (2012).

В докладе рассматриваются волноводный механизм электромагнитной накачки вдоль литосферных разломов, модель электротеплового пробоя флюидных мезополостей сферической формы и модель трещинного излияния лавы на основе уравнений бингамовских сред.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ КОНУСА НА МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СУПЕР-ЭВМ

В.А. Нерченко[1], *В.Ф. Никитин* [1,2], *Л.И. Стамов* [1,2]

[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
[2]ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

В работе рассматривается математическая и численная модели трехмерного нестационарного течения горючей газовой смеси с учетом моделирования турбулентности. В первоначальном положении в стехиометрической газовой смеси водорода с воздухом, заполняющей трубу круглого течения, движется ударная волна. Позади волны условия таковы, что химическая реакция возникнуть не может. Конец трубы слепой и сужается в виде конуса, так что при взаимодействии ударной волны со стенками в окрестности этого конца волна фокусируется и адиабатическое сжатие смеси в ней превышает температуру возгорания. После отражения волны от слепого конца трубы с конической вставкой в ней могут возникать режимы горения (дефлаграции) или детонации. При определенных условиях волна дефлаграции может затухнуть, а может перейти и в детонацию. Подобные режимы сгорания получались в экспериментах, проделанных на базе Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (г. Минск), наша же цель – созданную нами модель протестировать на этих экспериментальных данных.

Математическая модель основана на решении уравнений баланса массы компонент газа, уравнений импульса, уравнения энергии и двух уравнений модели турбулентности k-ω. Она дополняется детальной химической кинетикой, содержащей 20 обратимых реакций с участием 9 компонент, из которых 3 – исходные компоненты (водород, кислород и нейтральный азот), 1 – основной продукт реакции (водяной пар), а остальные 5 – свободные радикалы (промежуточные компоненты реакций).

Программный комплекс включает в себя следующие модули: построение сетки, построение начального состояния, расчет (который может возобновляться при перерыве), постпроцессор, визуализация данных. Расчет, построение начальных данных и обработка постпроцессором ускорены при помощи технологии распараллеливания OpenMP. Все основные операции, кроме визуализации данных, проводятся на супер-ЭВМ (сервере).

Были получены и продемонстрированы режимы: отсутствия возгорания смеси, мгновенного инициирования детонации в носике конуса, где температура и давление при отражении максимальны, и промежуточный режим, когда после отражения ударной волны возникает турбулентное горение с отделившейся и уходящей вперед отраженной ударной волной. С течением времени турбулентное горение постепенно усиливается, возникает момент, когда в окрестности оси трубы происходит резкий рост давления и формируется вначале сферическая детонационная волна, которая, отразившись от стенок трубы, уходит вперед как детонация, а назад – как ретонация недогоревшей смеси, вырождающаяся в сильную ударную волну в сгоревшем газе. Это режим перехода горения в детонацию.

Результаты об отражении от внутренней поверхности конуса согласуются с результатами экспериментов по скорости волны относительно потока газа (ударной или детонационной) и по времени прихода импульсов давления в заданные точки системы. Было получено, что скорость детонационной волны устанавливается несколько выше теоретической скорости Чепмена – Жуге, рассчитанной по данным термодинамики исходных компонент и условиям перед волной. То же самое получилось в эксперименте. Это объясняется тем, что детонационная волна идет не по покоящейся, а по заранее турбулизованной при помощи первичной ударной волны горючей смеси.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-03-00607).

О РАСЩЕПЛЕНИИ НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ В ТЕОРИЯХ ТОНКИХ ТЕЛ

М.У. Никабадзе [1,2], *А.Р. Улуханян* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Найдены обратные тензоры-операторы к тензору-оператору уравнений движения в перемещениях для некоторых анизотропных однородных материалов и соответствующим операторам напряжения, позволяющие расщеплять уравнения и граничные условия. А также построен обратный матричный дифференциальный тензор-оператор к матричному дифференциальному тензору-оператору уравнений движения микрополярной теории упругости в перемещениях и вращениях как для изотропных однородных материалов с центром симметрии, так и для материалов, не обладающих центром симметрии. Получены уравнения по отдельности векторов перемещений и вращений. Как частный случай рассмотрена редуцированная среда. Выявлены случаи, при которых легко обратить оператор напряжения и моментного напряжения. Рассмотрен случай ортотропного микрополярного материала.

Из расщепленных уравнений классической (микрополярной) теории получены соответствующие расщепленные уравнения статической (квазистатической) задачи теории призматических тел постоянной толщины в перемещениях (перемещениях и вращениях). Из последних систем уравнений в свою очередь выведены уравнения в моментах неизвестных векторных функций относительно любых систем ортогональных полиномов. Получены системы уравнений различных приближений (с нулевого по восьмого порядка) в моментах относительно систем ортогональных полиномов (Лежандра и Чебышева второго рода). На основании построенного обратного оператора к оператору какой-нибудь

из этих систем она расщепляется и для каждого момента неизвестной векторной функции получается уравнение эллиптического типа высокого порядка (порядок системы зависит от порядка приближения), характеристические корни которого легко находятся. Используя метод Векуа, можно получить их аналитическое решение.

Для микрополярной теории призматических тонких тел с двумя малыми размерами, имеющих поперечное сечение в виде прямоугольника, получены расщепленные уравнения в моментах векторов перемещений и вращений относительно произвольной системы полиномов (Лежандра, Чебышева). Аналогичные уравнения получены и для редуцированной среды, содержащие уравнение классической среды.

Получены расщепленные системы уравнений восьмого приближения микрополярной теории многослойных призматических тел постоянной толщины в моментах векторов перемещений и вращений. Для этих систем, а также для систем, получаемых из уравнений редуцированной среды и содержащих классические системы уравнений, используя метод Векуа, можно выписать аналитическое решение.

Работа выполнена при поддержке гранта совместных исследований с соотечественниками национального научного фонда им. Шота Руставели (проект № DI-2016-41), а также РФФИ (проект № 15-01-00848).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В НЕКОТОРЫХ СРЕДАХ ЧЕРЕЗ СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТЕНЗОРОВ

М.У. Никабадзе [1,2], *А.Р. Улуханян* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Выписаны динамические условия на фронте волны сильного разрыва в удобной для дальнейшего пользования форме как для классического, так и для микрополярного материала. Исходя из этих условий, на основании канонических представлений материальных тензоров получены дисперсионные уравнения (ранее дисперсионные уравнения для микрополярной среды в традиционном виде были получены в работе [1] для некоторых классических и микрополярных сред в каноническом виде. В этой связи использованы задачи на собственные значения тензора и тензорно-блочной матрицы любого четного ранга, для которых ранее были построены полные ортонормированные системы собственных тензоров для тензора и собственных тензорных столбцов для тензорно-блочной матрицы. А также был введен в рассмотрение символ анизотропии (структуры) материала, который обозначается $\{a_1, a_2, \ldots, a_k, \ldots, a_m\}$, где $a_k, k = 1,2,\ldots,m -$ кратность *k*-го собственного значения материального тензора, и была дана классификация некоторых анизотропных сред. Были найдены собственные значения и соответствующие собственные объекты некоторых кристаллографических материалов, а также для некоторых микрополярных сред [2].

Следует отметить, что собственные значения тензора и тензорно-блочной матрицы являются инвариантными величинами. Именно поэтому целью этой работы стало нахождение выражения для скоростей распространения волн некоторых сред через собственные значения материальных тензоров. В частности, рассмотрены материалы с символом анизотропии {1,5} и {5,1}, а также изотропные материалы и даны выражения для скоростей распространения волн для них. Кроме того, получены выражения для скоростей распространения волн для материалов кубической сингонии с символом анизотропии {1,2,3} (матрица компонент тензора модулей упругости имеет три

независимых компоненты), гексагональной сингонии (трансверсальной изотропии) с символом анизотропии {1,1,2,2} (матрица компонент тензора модулей упругости имеет пять независимых компонент)), тригональной сингонии с символом анизотропии {1,1,2,2} (матрица компонент тензора модулей упругости имеет шесть независимых компонент), тетрагональной сингонии с символом анизотропии {1,1,1,2,1} (матрица компонент тензора модулей упругости имеет шесть независимых компонент). Получены также выражения для скоростей распространения волн для микрополярной среды с символом анизотропии {1,5,3} и {5,1,3}, а также для изотропного микрополярного материала.

Работа выполнена при поддержке гранта совместных исследований с соотечественниками национального научного фонда им. Шота Руставели № DI-2016-41, а также РФФИ (проект № 15-01-00848).

Литература

1. *Улуханян А.Р.* Дисперсионные уравнения в моментной теории / А.Р. Улуханян // Деп. в ВИНИТИ РАН. 05.08.09. № 521. – В2009.
2. *Никабадзе М.У.* О некоторых вопросах тензорного исчисления с приложениями в механике / М.У. Никабадзе // Современная математика. Фундаментальные направления. – 2015. – Т. 55.

ВКЛАД И.Н. ЗВЕРЕВА В РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ДЕТОНАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ, КАВИТАЦИОННЫХ И ГЕЙЗЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЯХ

В.Ф. Никитин [1,2], *Н.Н. Смирнов* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2] ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

14 апреля 2017 г. исполнилось 100 лет со дня рождения первого сотрудника кафедры газовой и волновой динамики, первого ученого секретаря, Заслуженного преподавателя МГУ Игоря Николаевича Зверева. После окончания средней школы в 1935 г. он поступил на механико-математический факультет МГУ, который окончил в 1941 г. В годы Великой Отечественной войны И.Н. Зверев работал в коллективе отраслевой научно-исследовательской лаборатории по созданию новой реактивной техники. В его обязанности входила научная экспертиза изобретений и рацпредложений на предмет выявления наиболее эффективных. С 1943 по 1944 г. И.Н. Зверев работал в НИИ № 1. В 1949 г. И.Н. Зверев защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а в 1951 г. был переведен на должность доцента кафедры газовой динамики механико-математического факультета МГУ.

И.Н. Зверевым исследовано распространение сильных возмущений в гомогенных и гетерогенных средах с учетом неравновесных химических и физических превращений, распространение ударных волн в гомогенных и гетерогенных средах. Изучены ударные волны в двухфазной среде (воздух и твердая порошкообразная фаза) с учетом межгранулярного давления. Выявлено, что плотность твердой фазы и скорость звука в смеси оказывают решающее влияние на процессы распространения волн. Исследовано распространение собственной волны детонации.

В работах И.Н. Зверева исследовано распространение неодномерной детонации в предварительно не перемешанных двухфазных системах (криогенный окислитель и тонкий слой горючего на стенках). Показано, что образуется самоподдерживающийся нестационарный комплекс, содержащий сильные и слабые разрывы и зоны горения или

зоны детонации, периодически возникающие у стенок. Исследована детонация в тонких пластинах, пропитанных жидким кислородом, с учетом разлета в зоне детонации. Выявлена зависимость скорости распространения детонации от толщины пластины. Под руководством И.Н. Зверева исследованы естественно-конвективные течения в криогенных магистралях при боковом нагреве, показано образование застойных зон перегретой жидкости, в которых возможно испарение криогенных жидкостей и образование полостей, заполненных паром. В зависимости от расположения полости могут реализоваться два различных сценария, приводящих к катастрофическим разрушениям: либо резкое всплывание вскипающего объема жидкости в вертикальной трубе, приводящее к выбросу наподобие гейзерного, либо образование паровой полости, которая в дальнейшем может быть подвержена кавитационному схлопыванию при повышении давления в магистрали.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕАЛИСТИЧНЫХ ПОЛОСЧАТЫХ СТРУКТУР В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Н.В. Никитин

НИИ механики МГУ, Москва

Численно изучается эволюция малых возмущений в турбулентном течении в канале при числах Рейнольдса до $\mathrm{Re}_\tau = 586$. Развитые течения, рассчитанные интегрированием уравнений Навье – Стокса используются в качестве основных течений для изучения процесса развития малых возмущений. В согласии с результатами предыдущих исследований возмущения нарастают экспоненциально по времени, что может объясняться неустойчивостью пристенных полос. Однако процесс развития возмущений существенным образом определяется нестационарностью и пространственной неоднородностью основного турбулентного течения.

Автор работы следует представлению, что развитое турбулентное течение является результатом нелинейной эволюции возмущений, возникающих в результате его неустойчивости. С этой точки зрения сравнение характеристик развитого течения с пространственно-временными характеристиками линейно растущих возмущений показывает, в частности, что в процессе нелинейной стадии развития неустойчивые структуры кроме образования новых пристенных полос подвергаются удвоению в размерах в каждом из двух горизонтальных направлений.

Дана оценка величины каждого из членов выражения для производства кинетической энергии возмущений. Наибольший вклад предсказуемо вносят члены, отвечающие производству энергии градиентом средней скорости, а также градиентом скорости в сдвиговых слоях, разделяющих полосы ускорения и замедления. Однако оставшиеся члены, отражающие вклад наличия поперечного движения в основном течении, а также изменчивости потока в продольном направлении, также имеют существенное значение, внося до 40 % в производство кинетической энергии возмущений. Пренебрежение этими эффектами является неприемлемым. Таким образом, исследования неустойчивости полосчатого движения в рамках модели основного течения вида U(y, z), в которых пренебрегается наличием поперечного движения, а также не учитываются нестационарность и пространственная неоднородность основного течения, едва ли могут быть продуктивными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00140). Вычисления проводились на суперкомпьютере МГУ Ломоносов.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРЯМЫХ ТРУБАХ

Н.В. Никитин, Н.В. Попеленская

НИИ механики МГУ, Москва

Изучаются вторичные течения Прандтля второго рода, возникающие при турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в прямых прямоугольных трубах. Для этого решаются полные уравнения Навье – Стокса консервативным конечно-разностным методом для несжимаемой жидкости [1]. Вычисления проведены на суперкомпьютерном комплексе МГУ. Рассчитаны течения в трубах с соотношениями сторон поперечного сечения 1:1, 1:2 и 1:4 при числах Рейнольдса 2 205, 4 410 и 10 000.

Целью исследования является нахождение универсального параметрического соотношения, связывающего характеристики вторичных течений с характеристиками основного потока. Поскольку в развитом прямолинейном турбулентном потоке вторичное течение определяется по средней продольной компоненте завихренности, то именно эта характеристика представляется наиболее перспективной для данного исследования. Поле продольной компоненты завихренности, осредненное по времени и продольной координате, остается симметричным относительно биссектрисы угла поперечного сечения при изменении соотношения его сторон для всех рассмотренных чисел Рейнольдса. Ее распределение в окрестности углов не зависит от дальних границ и определяется локальными условиями. Проведен анализ уравнения для изменения завихренности и показан вклад источниковых, конвективных и вязких членов в производство средней продольной компоненты завихренности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-01-00295; 16-05-00004).

Литература

1. *Nikitin N.* Finite-difference method for incompressible Navier-Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates / *N. Nikitin* / Journal of Computational Physics. – 2006. – № 217(2).

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КИСЛОРОДА С КЛАСТЕРОМ $Au_n(SR)_m$ И ЕГО ФРАГМЕНТАМИ

Н.А. Никитина, Д.А. Пичугина, Н.Е. Кузьменко

Химический факультет МГУ, Москва

Кластеры золота, стабилизированные тиолатными лигандами ($Au_n(SR)_m$), привлекают интерес благодаря уникальным физическим и химическим свойствам и находят применение во многих областях, включая окислительный катализ. Точный атомный состав и специфическая структура кластеров делают возможным установление связи между структурой, свойствами и каталитической активностью. Несмотря на активные исследования в этой области, механизм взаимодействия $Au_n(SR)_m$ с кислородом до конца не установлен, что возможно исследовать с привлечением методов квантовой химии.

Цель данной работы заключалась в определении доступных активных центров $Au_{20}(SCH_3)_{16}$ в активации кислорода и возможного механизма окисления. Расчеты были проведены квантово-химическим методом PBE в базисе SBKJC.

На первом этапе были рассчитаны геометрии различных изомеров $Au_{20}(SCH_3)_{16}$. Наиболее стабильный по энергии изомер состоит из ядра Au7, октамерного кольца $(AuSCH_3)_8$ и фрагментов состава $SCH_3(AuSCH_3)_3$ и $SCH_3(AuSCH_3)$. Для кластера были рассчитаны электронные свойства, включая вертикальные и адиабатические, сродство к электрону и потенциал ионизации. Высокое значение рассчитанного потенциала ионизации свидетельствует о низкой реакционной способности кластера по отношению к кислороду.

В качестве возможных активных центров активации кислорода рассмотрены атомы золота оболочки кластеров $Au_{20}(SCH_3)_{16}$, $Au_{20}(SCH_3)_{15}$, а также входящие в различные его фрагменты $SCH_3(AuSCH_3)_x$ $(x=1,3)$, $(AuSCH_3)_8$, $(AuSCH_3)_4Au_2$. Оптимизация структуры окисленных комплексов и расчет энергии были проведены в сингелетном и триплетном электронных состояниях. Показано, что с термодинамической точки зрения окисление выбранных моделей возможно только синглетным кислородом. Энергия взаимодействия кислорода с отдельными фрагментами кластера выше, чем с $Au_{20}(SCH_3)_{16}$, что свидетельствует о возможном участии $SCH_3(AuSCH_3)_x$ $(x=1,3)$, $(AuSCH_3)_8$ в активации кислорода.

Было рассмотрено взаимодействие O_2 с $Au_{20}(SCH_3)_{15}$. Это моделирует случай частичного удаления лигандной оболочки в результате термической обработки образцов катализаторов. В этом случае образование пероксидных комплексов $Au_{20}(SCH_3)_{15}O_2$ является энергетически выгодным процессом. Дальнейший разрыв связи O-O в этих комплексах имеет высокую энергию активации.

Проведенное исследование показывает важную роль лигандов в активации кислорода на кластерах золота, стабилизированных тиолатными группами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-03-00962).

ЗАВИСИМОСТЬ РЕШЕНИЯ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА В ЗАДАЧЕ О КОНЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТРУБЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Н.В. Овчинникова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В работе рассмотрена задача о плоской деформации упругопластической трубы, находящейся под действием внутреннего и внешнего давления. Принято, что в процессе нагружения трубы величины усилий растут пропорционально одному параметру, соотношение между величинами усилий имеет постоянное значение, равное *k*. Материал удовлетворяет соотношениям теории течения с изотропным упрочнением и условию пластичности Мизеса. В работе получено численное решение задачи методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. В точках трубы не происходит поворота главных осей тензора растяжений. Поэтому принятая в данной модели при больших деформациях неголономная мера деформации, порожденная производной Динса, совпадает с тензором логарифмических деформаций Генки, а производная Динса для тензора напряжений Коши совпадает с его материальной производной. Численное решение задачи для упругосжимаемого материала (значения коэффициента Пуассона меньше 0,5) сравнивается с решением задачи для несжимаемого материала (в численном расчете этот случай моделируется величиной коэффициента Пуассона, равной 0,499). В расчетах рассмотрен случай линейного упрочнения материала.

Исследование зависимости решения от упругой сжимаемости материала, подтвердило выводы, полученные ранее при решении задачи для случая малых

деформаций. Так, минимальное отличие решений для сжимаемого и несжимаемого материалов наблюдается в случае действия на трубу только внутреннего давления. Для трубы под действием внешнего давления зависимость решения от значения коэффициента может быть существенной, причем она увеличивается с ростом относительной толщины трубы. Размер пластической области для сжимаемого материала может быть значительно больше, чем для несжимаемого материала. Осевое напряжение не является промежуточным главным напряжением для всех точек трубы. Наиболее сильно отличаются решения для сжимаемого и несжимаемого материала в случае, когда величины внутреннего и внешнего давления примерно одинаковы. Для равных значений внутреннего и внешнего давления решение задачи получено аналитически; оно совпадает с численным решением. Решение этой задачи существенно зависит от коэффициента Пуассона и мало зависит от упрочнения материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00669).

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО ШТАМПА НА УПРУГУЮ ПОЛУПЛОСКОСТЬ

А.С. Оконечников [1], *О.А. Панкратова* [1], *Г.В. Федотенков* [1,2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается однородная изотропная упругая полуплоскость. В начальный момент времени по нормали к границе полуплоскости внедряется жесткий штамп произвольной формы, который движется вдоль границы полуплоскости по некоторому закону от времени. Задача решается в предположении, что с момента начала взаимодействия штампа с полуплоскостью перемещения в области контакта известны и не зависят времени.

Таким образом, математическая постановка задачи включает в себя:

· уравнения движения полуплоскости в потенциалах;

· граничные условия, отражающие известные перемещения границы полуплоскости под штампом и отсутствие напряжений вне области контакта;

· однородные начальные условия из-за отсутствия возмущений в начальный момент времени.

Для решения задачи используется найденная ранее авторами поверхностная функция влияния для нормального подвижного сосредоточенного источника возмущений. Связь перемещений и напряжений на границе полуплоскости описывается с помощью принципа суперпозиции, согласно которому перемещения границы полуплоскости под действием распределенной на некоторой области границы полуплоскости нагрузки есть результат свертки упомянутой функции влияния с этой нагрузкой. Пользуясь данной связью перемещений и приложенной нагрузки, можно записать интегральное уравнение для определения контактных напряжений.

В качестве примера была решена задача для плоского жесткого штампа, движущегося с постоянной скоростью. Получены графические результаты, представлено сравнение решений при различных скоростях движения штампа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00260).

О ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ В СЛОЕ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

Д.В. Павлов, А.Г. Калугин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Нематические жидкие кристаллы представляют собой среды, молекулы или другие структурные единицы которых имеют сильно вытянутую форму. При этом в жидкокристаллической фазе существует среднее направление ориентации длинных осей молекул, описываемое единичным вектором – директором. Наличие такого макроскопического параметра приводит к появлению внутренней энергии Франка упругих искажений поля директора. С учетом группы симметрии нематика и условия постоянства длины директора в квадратичном разложении энергии Франка по градиентам вектора ориентации присутствует четыре независимых коэффициента, причем одно из слагаемых имеет дивергентную форму и не вносит вклад в уравнения движения или равновесия среды и эволюции ориентации. Однако его необходимо учитывать в краевых условиях, когда на границе объема положение директора не является заранее заданным, а определяется из условия минимума поверхностной энергии.

В работе рассматривается задача о равновесии планарно (параллельно границам) ориентированного плоского слоя нематического жидкого кристалла. Показано, что учет дивергентных слагаемых в свободной энергии упругости ориентации Франка позволяет получить нетривиальные периодические решения задачи о возмущениях директора с волновым вектором, лежащим в плоскости слоя и перпендикулярным невозмущенной планарной ориентации директора. Получены соотношения, связывающие величину коэффициента при дивергентных слагаемых с волновым числом, толщиной слоя и другими параметрами среды, проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Предложена новая интерпретация проведенных ранее экспериментов, на основании данных которых сделана количественная оценка величины дивергентного коэффициента энергии Франка для типичного представителя нематических жидких кристаллов МББА.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-00361).

БИПОЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЭГД-ТЕЧЕНИЯХ В МИКРОКАНАЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЛЯ НА ОБЪЕМНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

И.Л. Панкратьева, В.А. Полянский

НИИ механики МГУ, Москва

Электрогидродинамика течений слабопроводящих жидкостей в каналах микро- и наноразмеров привлекает в последние годы внимание в литературе в связи с необходимостью управлять поведением сверхмалых объемов жидкостей в устройствах, применяемых в биологических исследованиях, в различных биотехнологиях, фармацевтике, медицине и т.п. Доклад посвящен исследованию влияния сильных неоднородных электрических полей на процессы ион-ионной диссоциации в жидких слабопроводящих смесях при их течениях в плоских микроканалах. Анализируются эффекты, являющиеся следствием воздействия неоднородного поля на объемную электрохимическую кинетику в жидкостях при умеренных числах Дебая. Внешнее электрическое поле в слабопроводящих химически реагирующих средах воздействует на ионизацию как косвенно, путем перераспределения реагирующих заряженных

компонент, так и непосредственно, за счет увеличения кинетической скорости диссоциации нейтральных молекул на положительные и отрицательные ионы. В последнем случае в пристеночных слоях с сильной неоднородностью поля образуются биполярные структуры нескомпенсированного объемного заряда, на которые можно воздействовать приложенным продольным полем. Наличие слоев с противоположно направленными кулоновскими силами приводит к возникновению в профиле скорости точек перегиба. Это может вызвать неустойчивость течения и тем самым способствовать перемешиванию жидкости в микроканале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-00157).

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

П.П. Пастушков [1,2], *В.Г. Гагарин* [1,2], *С.В. Гувернюк* [1], *Н.В. Павленко* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]НИИ строительной физики РААСН, Москва

Рассмотрено изменение теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов вследствие замещения газа в порах материала на воздух. Создана математическая модель процесса и получено уравнение, описывающее изменение теплопроводности материала и определяемое двумя параметрами. Проведены эксперименты по измерению теплопроводности образцов пенополиизоцианурата в течение одного года. Полученные данные хорошо аппроксимируются выведенным уравнением материалов.

Получено выражение для коэффициента эмиссии волокон из минераловатных плит. Получены выражения, позволяющие оценить снижение термического сопротивления теплоизоляционного слоя в навесной фасадной системе за счет уноса волокон потоком воздуха. Проведены экспериментальные исследования коэффициента эмиссии волокон из минераловатных плит различных марок.

Разработана методика определения эксплуатационной влажности строительных материалов по результатам натурных исследований распределения влажности по толщине конструкции. Описана инженерная методика назначения расчетной влажности строительных материалов для различных условий эксплуатации по результатам натурных исследований. Проведены натурные исследования влажностного состояния основных видов теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций зданий. По результатам исследований установлены значения эксплуатационной влажности теплоизоляционных материалов.

Разработана методика оценки срока эффективной эксплуатации минераловатных теплоизоляционных материалов. Описан экспериментальный метод прогнозирования изменения теплофизических характеристик минеральной ваты при моделировании условий эксплуатации.

ЧИСЛЕННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ВСПЛЕСКОВ В ПОДОГРЕВАЕМОМ СНИЗУ НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Д.Е. Пивоваров, Н.В. Никитин

НИИ механики МГУ, Москва

Конвективные всплески представляют собой локализованные по пространству и времени структуры, возникающие на фоне ламинарного течения. Впервые это явление было обнаружено в опытах по тепловой конвекции в наклонных слоях. Было замечено, что всплески образуются при числе Рэлея близкому к значению, которое соответствует образованию вторичных конвективных структур в виде цепочки параллельных вихрей (называемых валами), и при угле наклона, разделяющем зоны образования конвективных валов различной ориентации. В случае наклонного канала существует два значения упомянутого угла наклона. Настоящая работа посвящена численному обнаружению конвективных всплесков при втором значении угла наклона.

Рассматривается наклонный по отношению к горизонту канал теплопроводной жидкости, ограниченный двумя изотермическими стенками. В слое устанавливается подъемно-опускное течение. После потери устойчивости такого течения устанавливается режим валиковой конвекции. На фоне этого режима при определенном значении угла наклона в экспериментах наблюдаются турбулентные всплески. В настоящей работе осуществляется численное моделирование этого явления.

В качестве математической модели используется система уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска. Численное решение системы ищется конечно-разностным методом. На торцевых границах задаются условия периодичности. Начальное поле скорости соответствует подъемно-опускному течению, а начальное поле температуры определяется суммой линейной функции и гармонических колебаний конечной амплитуды.

В работе определены зависимости от времени среднеквадратичного отклонения температуры от начального поля и теплового потока через изотермическую поверхность. Показана возможность численного моделирования турбулентных всплесков в термогравитационной конвекции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-31-00521).

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ПРИСТЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУКТУРАХ

В.О. Пиманов, Н.В. Никитин

НИИ механики МГУ, Москва

Цикл самоподдержания пристенной турбулентности связывают с долгоживущими в сравнении с пульсациями структурами, наблюдаемыми около стенок. Они проявляются в форме вытянутых вдоль потока полос, скорость жидкости внутри которых выше или ниже среднего значения на данном расстоянии от стенки. Считается, что пульсации в потоке возникают в результате неустойчивости полосчатого профиля скорости, в то время как сами полосы формируются за счет нелинейного действия пульсаций. Несмотря на большой интерес, детали цикла самоподдержания пристенной турбулентности до сих пор остаются неизвестны.

Приблизиться к пониманию турбулентных течений позволяют решения уравнений Навье – Стокса, имеющие регулярное поведение в пространстве и во времени. Хотя такие решения неустойчивы, они могут быть найдены численно. Используя конечно-разностный метод, авторами работы было получено несколько решений типа бегущей волны в плоском канале и в круглой трубе. Они являются периодическими вдоль потока, стационарными в некоторой подвижной системе отсчета. Кроме того, было исследовано локализованное вдоль потока решение, полученное в круглой трубе. Оно является периодическим по времени в подвижной системе отсчета.

Анализ найденных решений позволил выделить общие черты механизма их самоподдержания. В каждом из них присутствуют полосы повышенной и пониженной скорости. Они возникают за счет действия продольных вихрей, перемещающих жидкость в нормальной к основному потоку плоскости. Полосы оказываются неустойчивы, в результате чего в потоке рождаются пульсации. Продольные вихри возникают в результате нелинейного взаимодействия пульсаций продольной скорости и продольной завихренности. Был выделен механизм формирования пульсаций продольной завихренности, обеспечивающий их согласованность по фазе, необходимую для формирования продольных вихрей.

Авторы доклада полагают, что найденные детали цикла самоподдержания могут быть обобщены на случай турбулентного течения, но в настоящее время утверждать этого не представляется возможным.

Работа выполнена на базе суперкомпьютерного комплекса МГУ при поддержке РФФИ (проекты № 17-01-00140; 16-31-00522-мол-а).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ РЕКОМБИНАЦИИ $H + O_2 \to HO_2$ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

М.Ю. Погосбекян, А.А. Крупнов

НИИ механики МГУ, Москва

Процесс рекомбинации $H + O_2 + M \to HO_2 + M$ играет существенную роль при горении водородно-воздушной смеси и является реакций обрыва цепей. Стоит отметить, что процесс рекомбинации идет с выделением тепла и не возможен без участия третьей частицы M. При этом скорость протекания реакции может на несколько порядков отличаться, в зависимости от того, какая молекула или атом выступают в роли третьей частицы $(M = H, O_2, OH, HO_2$ и т.д.$)$. Экспериментальные данные для этой реакции имеют большую неопределенность, а теоретические работы по определению константы скорости рекомбинации и исследованию эффективности третьей частицы фактически отсутствуют. В этой связи данная работа, направленная на детальное исследование реакции рекомбинации $H + O_2 + M \to HO_2 + M$ из первых принципов с использованием методов квантовом механики и молекулярной динамики, является весьма актуальной.

Процесс рекомбинации можно разбить на два этапа: взаимодействие молекулярного кислорода с атомарным водородом с образованием возбужденного состояния молекулы $HO_2(*) - H + O_2 \to HO_2(*)$; ее последующее взаимодействие с третьей частицей с формированием стабильной молекулы $HO_2 - HO_2(*) + M \to HO_2 + M$. В данной работе, для последующего сравнения с экспериментальными данными, в качестве третьей частицы был выбран атом аргона $M = Ar$.

Методом функционала плотности DFT с использованием базиса B3LYP были проведены расчеты поверхностей потенциальной энергии для обоих этапов процесса рекомбинации. Было рассчитано более 6500 точек на всем конфигурационном пространстве. Для аналитического представления поверхности потенциальной энергии указанных процессов данные точки были аппроксимированы функцией Сорби – Маррелла в рамках Many Body Expansion Method. С использованием полученных поверхностей были проведены молекулярно-динамические расчеты в результате которых была определена константа скорости рекомбинации $H + O_2$ с участием атома Ar в качестве третьей частицы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССОЦИАЦИИ АЗОТА: ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТ

М.Ю. Погосбекян, А.Л. Сергиевская, Г.Д. Смехов

НИИ механики МГУ, Москва

Для физико-химических процессов за фронтом сильных ударных волн характерно отсутствие равновесия между поступательными и колебательными степенями свободы молекул реагентов. При этом следует учитывать, что поступательная температура может достигать десятков тысяч градусов. В этих условиях для описания процессов диссоциации молекул необходимо учитывать зависимость константы скорости химической реакции как от поступательной, так и от колебательной температур. При отсутствии надежных экспериментальных данных были созданы различные теоретические модели (модель Мерроуна – Тринора, Кузнецова, Мачерета – Фридмана, Парка и т.д.), которые позволяют рассчитывать константы скорости химических реакций для разных уровней описания неравновесности – от двухтемпературного до уровневого. Однако многие модели имеют эмпирические параметры, при этом авторские рекомендации по их выбору часто имеют ограниченный характер, связанный с конкретной авторской задачей как по моделируемым процессам, так и по характеристикам среды, в которой происходят исследуемые процессы.

В течение последних лет была разработана методика сравнительного исследования моделей физико-химических процессов, позволяющая верифицировать эти модели и определять рекомендуемые параметры, используемые в них. Методика основана не только на всестороннем анализе авторских моделей и перекрестном сравнение моделей, но, что крайне важно, сравнении моделей с результатами траекторных расчетов и имеющимися современными экспериментальными данными.

В данной работе всесторонне исследован процесс диссоциации $N_2 + N \to 3N$ в условиях термической неравновесности в широком диапазоне поступательных температур 3000-20000 K методом квазиклассических траекторий (МКТ). Моделирование молекулярной динамики проводилось с помощью вычислительного комплекса «MD Trajectory». В расчетах использовалась поверхность потенциальной энергии в виде обобщенной модели LEPS. Вычислительные эксперименты по сравнительному моделированию и верификации проводились в среде Интернет-Каталога моделей физико-химических процессов. Каталог – коллекция описаний моделей процессов на разных уровнях приближения, содержащая и базу соответствующих вычислительных модулей, и базу данных, включающую все необходимые данные по молекулам, участвующим в процессах, парам молекул и равновесным характеристикам самих процессов.

Проведено сравнение результатов траекторных расчетов с теоретическими моделями как по уровневому фактору, так и по фактору неравновесности. Показано, что кривые, соответствующие МКТ расчетам, лежат между значениями, полученными по

моделям Смехова и Мэрроуна-Тринора. Сравнение с имеющимися экспериментальными данными, полученными М.С. Яловиком, по фактору неравновесности показало, что наиболее близко к ним лежит кривая, соответствующая модели Мэрроуна – Тринора.

ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОЙ ТРУБКИ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЧЕРЕЗ НЕЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

А.Б. Порошина, В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ, Москва

Ранее экспериментальные и теоретические исследования течения жидкостей в упругих трубках проводились только для ньютоновских жидкостей. Подобные исследования имеют приложение в биологии. Однако существуют условия, при которых многие биологические жидкости обладают неньютоновскими свойствами. Колебания упругих трубок могут возникнуть из-за потери устойчивости трубки, при существенной разнице давлений внутри и снаружи трубки, и из-за несуществования стационарного состояния трубки при протекании жидкости.

В настоящей работе для стационарных состояний трубки проведено аналитическое исследование уравнений движения, учитывающее реологию неньютоновских жидкостей и образующийся при протекании профиль скорости. Существование и единственность осесимметричных состояний упругих трубок при протекании степенных жидкостей также исследовалась теоретически.

Для невязкой жидкости с заданным профилем скорости, протекающей внутри достаточно длинной трубы, найдены условия существования стационарного состояния трубки. Показано, что при учете вязкости трубка может иметь только конечную длину. Для достаточно малой длины трубки и при соблюдении ряда условий состояние трубки, удовлетворяющее граничным условиям, может быть неединственным.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СЕМЕЙСТВА НЕСКОЛЬКИХ РЕЖИМОВ АВТОРОТАЦИИ

О.Г. Привалова

НИИ механики МГУ, Москва

Проводится сравнительный аналитический и численный параметрический анализ устойчивости режимов авторотации, возникающих в задачах о движении симметричного оперенного тела в сопротивляющейся среде.

Рассматривается две задачи о движении динамически симметричного оперенного тела в сопротивляющейся среде. В одной из них исследуется поведение тела, установленного с помощью сферического шарнира в аэродинамической трубе, а в другой изучается свободное движение тела в воздухе под действием постоянной силы тяги, направленной вдоль оси динамической симметрии тела.

Области устойчивости режимов авторотации строятся в полном пространстве параметров задачи о вращении тела в аэродинамической трубе. Такое геометрическое представление областей устойчивости дает возможность оценить влияние на устойчивость режимов авторотации таких параметров как смещение центра масс, отношения моментов инерции, значений установочного угла лопастей.

Проведенный сравнительный анализ областей устойчивости двух режимов авторотации, позволяет использовать результаты продувок тела в аэродинамической трубе для обеспечения устойчивого свободного полета.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЛНОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ В ЛАБОРАТОРНОМ И ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В.В. Прокофьев, Е.В. Филатов, А.К. Такмазьян

НИИ механики МГУ, Москва

Ранее были проведены исследования прямоточного волнодвижителя на модели катамарана длиной более 6 м в отсутствие килевой качке.

В настоящем докладе численно исследован метод увеличения эффективности прямоточного волнового движителя с использованием погруженной качающейся пластины.

В экспериментах использована модель короткого катамарана длиной 1,7 м, для которого существенна килевая качка. В условиях килевой и вертикальной качки проведены испытания прямоточного волнодвижителя (жестко соединенной с судном наклонной пластины). Кроме того, проведены сравнительные испытания волновых движителей других типов – гибких пластин и подводных парусов. Причем все они имели примерно одинаковую длину (площадь). Исследовалась эффективность движителей в широком диапазоне длин волн, при различном размещении движителей на корпусе судна. Обнаружено, что наличие килевой качки уменьшает максимальную скорость судна с прямоточным волнодвижителем в 1,5 раза. Однако применение демпфирующей пластины на корме судна поднимает эффективность волнодвижителей до уровня, полученного на длинном судне

При носовом размещении гибкой пластины ее эффективность близка к эффективности прямоточного волнодвижителя в условиях качки судна. Гибкая пластина, размещенная на корме судна, значительно теряет в эффективности по сравнению с носовым размещением – при этом развивается очень сильное раскачивание носовой части судна. Однако две гибких пластины, расположенные в носовой и кормовой частях судна, обеспечивают примерное удвоение скорости движения судна по сравнению с одной носовой пластиной. Наибольшую эффективность показал волнодвижитель типа парус, расположенный в носовой части судна. Оказалось, что натяжение паруса должно допускать значительное отклонение паруса от стационарного положения. Тот же волновой движитель еще большую эффективность показал при движении судна по волнам.

ДВА ПРИМЕРА ОГРАНИЧЕННОСТИ «ОГРАНИЧЕННЫХ» ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

В.А. Прошкин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Ограниченные задачи возникают, когда в механических системах пренебрегают некоторыми взаимодействиями. Обычно это приводит к упрощению уравнений движения, например к полному или частичному их разделению. Всегда полезно представлять границы применимости ограниченной задачи для описания той части движения системы, к которой она относится. В работе рассмотрены два примера.

Первая система состоит из круглого однородного диска, вращающегося вокруг его неподвижного горизонтального диаметра, и точки, движущейся по ободу диска. Движение происходит в однородном поле тяжести без трения. Если точка имеет достаточно большую скорость относительно диска, то ее движение близко к равномерному и слабо зависит от движения диска. В такой ситуации естественно рассмотреть ограниченную задачу, в которой точка движется по заданному закону – равномерно и достаточно быстро, а изучается только вращение диска. Влияние точки на это вращение можно приближенно описать методом осреднения: в полной задаче по быстрой фазе, в ограниченной – по времени. Оказывается, соответствующие осредненные системы в старшем приближении имеют одинаковые положения равновесия: когда плоскость диска горизонтальна и когда вертикальна. Причем в полной системе первое положение устойчиво, второе – нет, а в ограниченной наоборот. Эти равновесия порождают в системах периодические решения, в окрестности которых движения происходят принципиально по-разному в полной и в ограниченной задачах.

В качестве второго примера рассмотрим задачу о движении твердого тела в гравитационном поле, близком к центральному. Это классическая модель небесной механики. Не менее классической является и ее ограниченный вариант – задача о вращении тела вокруг центра масс на заданной орбите. Вторая задача получается из первой в результате предельного перехода, в котором размеры тела устремляются к нулю, но уравнения вращения не исчезают. Укажем условие, при выполнении которого ограниченная задача имеет в некотором смысле максимальную точность. Речь будем вести о движении несимметричного тела с быстрым вращением. В фазовом пространстве будем говорить только об области, которая соответствовала бы кеплеровским эллиптическим траекториям центра масс, если бы гравитационное поле было центральным, а тело – точкой, и в которой нет множеств, соответствующих нулевой угловой скорости вращения и перманентным вращениям тела вокруг неподвижного центра масс, когда сил нет. В каждой точке такой области определена величина, которую для краткости назовем отношением частот, – отношение средней угловой скорости поворота фокального радиус-вектора центра масс к модулю угловой скорости вращения тела. Если характерная величина этого отношения достаточно мала, но при этом много больше относительного отличия гравитационного поля от центрального, то с точностью до куба отношения частот уравнения вращения в полной и ограниченной задачах совпадают. Иначе в число членов такого порядка уравнений полной системы включаются слагаемые, появление которых в рамках ограниченной задачи невозможно. Это приводит к альтернативе: либо использовать более грубое приближение в ограниченной задаче, либо учитывать влияние вращения на орбиту.

В задаче о движении искусственных спутников Земли ограниченная модель с максимальной точностью имеет приложения, а вот подходящих астероидов – несимметричных небесных тел – в солнечной системе очень мало, большинство из них вращается слишком быстро.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПЛОСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ С ПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ ДЛЯ АБСОЛЮТНО ТВЕРДЫХ УДАРНИКОВ И УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Р.Д. Пряжевский [1], *Г.В. Федотенков* [2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Рассматривается плоская нестационарная задача о вдавливании полубесконечного штампа в упругое полупространство. Закон движения штампа произвольный, заданный

по всей длине штампа. Полупространство до взаимодействия находится в недеформированном состоянии. Штамп движется по нормали к поверхности пространства. Постановка задачи включает в себя уравнение движения, записанное в безразмерном виде, начальные и граничные условия. Неизвестными функциями при этом являются перемещения вне области контакта и контактное давление в ней, зависящее от времени. Так же делается предположение о непрерывности перемещений на границе штампа и ограниченности их на бесконечности. Метод решения основан на введении аналитических продолжений для искомых функций. Применяется аналитический алгоритм совместного обращения преобразований Фурье – Лапласа. Существенным является тот факт, что функция, описывающая движение штампа должна быть однородной и удовлетворять условию Гельдера. Получено аналитическое решение задачи для скорости границы контакта, не превышающей скорость волны Рэлея.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00260).

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАР-ЖИДКОСТЬ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ШАРА

Ю.Ю. Пузина [1], *В.Ю. Левашов* [2]

[1]НИУ «МЭИ», Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

При решении задач испарения – конденсации особенно важными становятся условия сопряжения систем уравнений, записанных для пара и жидкости на границе раздела фаз. Эти граничные условия определяют интенсивность процессов переноса (плотности потоков массы и тепла). Обычным подходом к постановке граничных условий на проницаемой межфазной поверхности пар – жидкость является задание температуры соответствующей по линии насыщения внешнему давлению и доли теплового потока на испарение (как правило, считается, что вся теплота на межфазной поверхности затрачивается на испарение жидкости). При более полной постановке задачи необходимо считать как температуру межфазной поверхности, так и удельный массовый поток искомыми величинами. Однако в такой постановке задачи оказывается, что определить эти величины без применения неравновесных граничных условий, т.е. без использования молекулярно-кинетической теории, невозможно.

Рассмотрим задачу о росте пленки пара на поверхности шарового нагревателя заданного радиуса, который погружен в жидкость на глубину h. Принимается, что температура нагревателя выше температуры предельного перегрева жидкости, таким образом, на поверхности шара образуется паровая пленка конечного размера. Над свободной поверхностью поддерживается постоянное давление. В упрощенной постановке задачи, когда жидкость является насыщенной, температура межфазной поверхности постоянна и соответствует температуре насыщения при давлении над свободной поверхностью, а весь тепловой поток затрачивается на испарение жидкости. Движение межфазной поверхности описывается уравнением Рэлея – Лэмба. Распределение давления в жидкости определяется на основании уравнения гидростатики. На границе раздела фаз записывается уравнение Лапласа. Теплота в паре распространяется теплопроводностью и излучением. Давление в паре можно рассчитывать исходя из двух различных подходов: 1) изменение давления определяется на основании дифференцирования уравнения состояния идеального газа; 2) давление определяется на основании неравновесного

граничного условия, полученного при решении кинетического уравнения Больцмана моментным методом для задач испарения-конденсации. Это граничное условие позволяет связать актуальное давление пара с тепловым потоком на межфазной поверхности и давлением насыщения, соответствующим температуре этой поверхности.

Результаты расчета динамики паровой пленки насыщенной воды в случае первого подхода показывают, что граница раздела фаз совершает колебания. При этом среднее значение толщины паровой пленки непрерывно возрастает вследствие притока массы с межфазной поверхности. Для второго варианта – рост паровой пленки не сопровождается колебаниями, а происходит непрерывно, при этом скорость роста, практически не зависящая от массового потока, значительно выше, чем для первого варианта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-06145).

ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ЛИНЕЙНО ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ

С.Г. Пшеничнов

НИИ механики МГУ, Москва

Построению решений нестационарных динамических задач линейной вязкоупругости посвящен целый ряд публикаций, и наиболее часто применяемым методом в этой области является интегральное преобразование Лапласа по времени. Однако сложность построения оригинала является причиной того, что авторы часто ограничиваются асимптотическим обращением, либо представляют решение в форме, трудно поддающейся анализу. Таким образом, получение решений задач указанного класса в широком диапазоне изменения времени и при отсутствии предположения о малости вязкости остается актуальным. В данной работе излагаются теоретические положения о свойствах Лапласовых трансформант нестационарных динамических задач линейной вязкоупругости при ограниченности области распространения возмущений и ограниченной ползучести материала; деформации считаются малыми. Предполагается, что после применения к исходной динамической задаче интегрального преобразования Лапласа по времени решение в изображениях удается построить и основное внимание уделяется операции обращения этого решения в пространство оригиналов. Исследуется возможное расположение и характер особых точек решения в изображениях. Формулируются и доказываются утверждения о связи точек ветвления и полюсов трансформанты решения нестационарной динамической задачи вязкоупругости со спектром соответствующей задачи о свободных колебаниях рассматриваемого тела. Обсуждаются разные формы представления решения в оригиналах.

В качестве примера реализации изложенных теоретических положений рассмотрена задача о распространении одномерных нестационарных волн сдвига в поперечном сечении однородного изотропного линейно вязкоупругого бесконечно длинного цилиндра, изначально находящегося в невозмущенном состоянии. Внутренняя поверхность цилиндра жестко заделана, а на внешнюю с некоторого момента действует равномерно распределенная вдоль образующей осесимметричная сдвигающая нагрузка. Таким образом выполнены условия плоской деформации. Для случая, когда зависимость внешнего воздействия от времени имеет характер функции Хевисайда, а ядро сдвиговой релаксации является регулярным двухпараметрическим экспоненциальным, оригинал представлен в виде ряда по вычетам в полюсах соответствующего изображения. Все этапы построения этого ряда математически строго обоснованы, описана структура множества особых точек изображения, показано, что это множество имеет предельную

точку помимо бесконечно удаленной. Сформулировано достаточное условие того, чтобы все полюса изображения имели первый порядок. Полученный результат фактически означает разложение решения нестационарной динамической задачи в ряд по собственным формам свободных колебаний вязкоупругого цилиндра, причем слагаемое, соответствующее вычету в нуле, является решением статической задачи теории упругости для цилиндра с соответствующим длительным модулем. На основе полученного решения легко строятся решения и при других законах изменения внешнего воздействия с течением времени. Подчеркнем, что решение построено без предположения о малости вязкости и оно справедливо во всем диапазоне изменения времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-08-00787; 17-08-01146).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ НАГРЕТОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ, НАТЕКАЮЩЕЙ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

А.И. Решмин, Ю.С. Зайко, А.Д. Сударикова,
С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов

НИИ механики МГУ, Москва

Приведены результаты экспериментального исследования натекания нагретой затопленной струи с начальной интенсивностью турбулентности 2 % диаметром 300 мм на плоскую поверхность, расположенную на расстоянии 2,5 диаметров струи ниже формирующей струю установки. Изучено влияние архимедовых сил на течение начального участка струи, где скорость в ядре потока сохраняется.

Для формирования струи использована специально разработанная технология. Основным элементом формирующего струю устройства являлся сверхкороткий диффузор – круглый короткий диффузор с проницаемой перегородкой в выходном сечении.

Проведены измерения характеристик формируемой затопленной струи на удалениях от 150 до 700 мм от ее начала, при скорости на оси струи от 1 до 2 м/с, при температуре воздуха от комнатной до 30 ^{o}C в условиях натекания на горизонтальную плоскую поверхность, расположенную в 800 мм от начала струи. Измерения скорости потока делались с помощью проволочного термоанемометра. Использовались датчики скорости с термокомпенсацией 55P81 и датчики температуры 55P31. Датчики располагались на устройстве перемещения, допускающем позиционирование с точностью 0,2 мм.

Результаты измерений параметров потока нагретого до 30 ^{o}C воздуха на расстоянии 100 и 200 мм (меньше 1 диаметра струи) от поверхности показывают, что, при начальной скорости потока в центре струи 1 м/с и меньше, из-за всплывания струи симметрия потока нарушается. При начальной скорости на оси струи выше 1 м/с профиль скорости в струе почти не отличается от начального. Интенсивность пульсаций скорости в ядре потока, где скорость постоянна по радиусу, почти не отличается от начальной.

Показана возможность применения разработанной технологии в газодинамической установке для организации локальной абактериальной зоны в мобильной установке медицинского назначения

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00115).

РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КОНИЧЕСКОМ ДИФФУЗОРЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

А.И. Решмин, А.Д. Сударикова, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов

НИИ механики МГУ, Москва

Проведены экспериментальные и расчетные исследования характеристик течения в коническом диффузоре с углом раскрытия $\sim 1{,}2\,^\circ$, входным $D_1 = 6$ мм и выходным $D_2 = 20{,}4$ мм диаметрами $(D_2/D_1 = 3{,}4$ мм), длиной $L = 710$ мм (параметры во входном сечении диффузора обозначаются индексом 1, в выходном – 2). Воздух на вход в диффузор подавался через трубы с различными диаметрами d. Диаметр и длина труб выбирались так, чтобы на выходе из трубы было сформировано развитое турбулентное течение для всего диапазона расходов, соответствующих числам Рейнольдса на выходе из диффузора $400 < \mathrm{Re}_2 < 3000$. В случае, когда диаметр трубы был равен входному диаметру диффузора $(d = D_1 = 6$ мм), параметры течения на входе в диффузор менялись непрерывно. При $d = 3{,}0$ и $1{,}7$ мм $(d < D_1)$ имело место внезапное расширение канала, это создавало на входе в диффузор возмущения потока различной интенсивности.

В отличие от диффузора с углом раскрытия $\sim 0{,}6\,^\circ$ и длиной 420 мм, где формировалось течение с отрицательным, близким к нулю, продольным градиентом давления [1], в исследуемом диффузоре, согласно расчетам, имеет место положительный продольный градиент давления.

Получены экспериментальные и расчетные профили скорости и напряжений Рейнольдса в выходном сечении диффузора для $\mathrm{Re}_2 = 800; 1300; 1600; 1900; 2800$. Проведено сравнения с профилями, для диффузора с углом раскрытия $\sim 0{,}6\,^\circ$ и круглой трубой [1]. Экспериментально и численно показано сильное влияние продольного градиента давления на величину напряжений Рейнольдса. Расчет проводился с использованием трехпараметрической модели турбулентности [2]. Было получено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Экспериментальное исследование течения в канале конического диффузора показало, что при различных способах подачи турбулентного потока воздуха на выходе диффузора формируется турбулентное течение, при $\mathrm{Re}_2 > 800$. Параметры потока в выходном сечении диффузора не зависят от способа подачи воздуха в диффузор. Процесс формирования турбулентного течения при числах Рейнольдса на выходе больше 800 полностью происходит внутри диффузора. Параметры турбулентного течения на выходе из диффузора определяются только числом Рейнольдса и не зависят от условий на входе, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения.

Литература

1. *Решмин А.И.* Турбулентное течение в круглом безотрывном диффузоре при числах Рейнольдса меньших 2000 / А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2011. – № 2.
2. *Лущик В.Г.*Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности / В.Г. Лущик, А.А. Павельев, А.Е. Якубенко //Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1978. – № 3.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПРООБРАЗОВ ПРОГРАММ, КОМПЕТЕНТНЫЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОДА

В.А. Роганов

НИИ механики МГУ, Москва

Проблема поддержки большого количества аппаратных платформ, в том числе специализированных, стоит сегодня перед ИТ-отраслью как никогда остро. Требуется создание корректных, эффективных программ для различных вычислительных устройств: от перспективных СуперЭВМ экзафлопсного диапазона до микроконтроллеров, используемых сегодня для создания прототипа Интернета вещей.

Прообразы программ представляют собой объекты с «хорошими» свойствами, прежде всего комбинационными, из которых легко получать эффективные программы при помощи так называемых компетентных баз знаний. Последние определяются и строятся как эффективные средства автоматического логического вывода последовательности операторов программы, эффективно решающих задачи из заранее определенного класса на заданном множестве программно-аппаратных платформ. Вопросы корректности и безопасности сгенерированного программного кода в этом случае решаются преимущественно на уровне компетентной базы знаний при помощи прямых математических методов.

В соответствии с уровнем «интеллекта» и степенью участия компетентной базы знаний в процессе вывода целевой программы, прообразы программ естественно делятся на три основных класса:

1) представленные в виде детализированного кода, из которого относительно легко можно вывести целевую программу. С этим классом, в частности, тесно связаны современные подходы с предметно-ориентированными языками (DSL и EDSL). Компетентная база знаний в этом случае относительно проста, поскольку заметная часть нагрузки переносится на DSL-представление.

2) записанные в виде естественной для человека постановки задачи для случаев хорошо формализованной, «разрешимой» предметной области. К этому классу можно отнести, в частности, постановки в виде уравнений математической физики, для которых синтезатор может выбрать наиболее эффективный для конкретной задачи вычислительный метод из набора заранее известных.

3) записанные в виде естественной постановки задачи для сложных, в общем случае «неразрешимых» предметных областей. В этом случае прообраз программы содержит набор правил, дополняющий основную базу знаний для предметной области до компетентной в рамках решения этой конкретной задачи. К этому классу можно отнести прообразы программ для решения весьма широкого круга практически важных задач.

Генерация программного кода под возникающие уже в процессе счета подзадачи может производиться динамически. Сгенерированный программный код в этом случае естественно получает дополнительную специализацию, которую невозможно было бы провести до того, как постановка задачи стала известна.

ДИНАМИКА УПРУГИХ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ: НИЗКОЧАСТОТНЫЕ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПРОЦЕССЫ

М.Ю. Рязанцева

НИИ механики МГУ, Москва

Вопросы, связанные с анализом динамического поведения слоистых композитов при нестационарном нагружении, представляют большой практический интерес.

Известно, что классическая динамическая теория упругих пластин (однородных и неоднородных по толщине) правильно описывает напряженные состояния и интегральные динамические характеристики только в области длинных волн и низких частот. При возрастании частоты колебаний классическая двумерная теория пластин даже качественно не описывает такие эффекты, как «толщинные» колебания, дисперсию волн, конечность распространение фронтов и др. Расширение границ применимости осредненной динамической теории возможно, если, наряду с классическими формами колебаний, описывающими низкочастотные процессы, учитывать их взаимодействие с тремя первыми высокочастотными модами. Осредненные линейные динамические уравнения выводились из трехмерной теории при помощи вариационно-асимптотического метода. Из решения задачи о свободных колебаниях бесконечной упругой трехслойной пластины определены длинноволновые асимптотики собственных форм, которые принимались в качестве законов распределения перемещений по толщине пластины.

Для исследования характерных особенностей динамического поведения sandwich-композита решена задача о реакции трехслойной балки-полоски на ударное воздействие.

Рассматривалась трехслойная упругая балка-полоска симметричного строения по толщине, с идеальным контактом на границе слоев и жесткой заделкой на торцах. Предполагалось, что нормально ориентированная равномерно распределенная по длине нагрузка приложена к одному из несущих слоев. Рассматривался случай внезапного воздействия импульса давления заданной интенсивности с экспоненциальным затуханием по времени.

Задача решалась на основе двумерных уравнений, учитывающих высокочастотные формы колебаний, искомыми величинами при этом являлись прогиб срединной поверхности и обжатие поперечного волокна. Интегрирование системы разрешающих уравнений производилось с использованием метода Фурье по координате и интегрального преобразования по времени.

Численные расчеты проводились для балки-полоски длиной 1 м и толщиной пакета – 20 мм, несущие слои которой выполнены из дуралюмина, а заполнитель – из материала марки ПХВ-1. Решение представлено в виде графиков зависимостей прогиба срединной поверхности пластины и обжатия поперечного волокна от времени в срединном по длине сечении балки-полоски. По известным функциям прогиба и поперечного обжатия можно определить трехмерные характеристики напряженно-деформированного состояния трехслойной балки-полоски.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00034).

НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА В ЦИКЛАХ ПУАНКАРЕ

Т.В. Сальникова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Анри Пуанкаре рассматривает бесстолкновительную сплошную среду на отрезке прямой с упругими отражениями от концов отрезка – одномерный газ. Независимо от начального распределения газ необратимо стремится равномерно заполнить интервал. Каждая молекула газа возвращается к своему начальному состоянию бесконечно много раз. Однако эта индивидуальная возвращаемость не является равномерной, что приводит к необратимому поведению рассматриваемой системы.

Пусть к находящемуся в равновесии одномерному газу приближено гравитирующее тело, а после того, как газ снова придет в состояние равновесия, тело убирается. После этого газ снова стремится равномерно заполнить интервал. Итак, газ осуществляет замкнутый цикл, который В.В. Козлов определил как цикл Пуанкаре, подобно циклу Карно. Но в отличие от цикла Карно цикл Пуанкаре неравновесный и необратимый.

Мы рассматриваем начальную функцию плотности распределения по скоростям, пропорциональную квадрату скорости. В частности, распределение Максвелла не удовлетворяет этому условию. Добавим силовое поле и подождем, пока система не придет в состояние равновесия. Затем уберем силовое поле и снова дождемся равновесного состояния. Повторяя эти циклы, мы получим различные промежуточные типы плотности и ее асимптотическое поведение. Оказывается, что при многократном повторении циклов Пуанкаре плотность распределения вероятности необратимо стремится к распределению Максвелла.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-03747).

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕЛЕТА К ФОБОСУ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ БОЛЬШОЙ И МАЛОЙ ТЯГОЙ

А.С. Самохин [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]РУДН, Москва

Рассматривается актуальная задача оптимизации пространственного перелета космического аппарата (КА) к Фобосу. В первой версии проекта Фобос-Грунт предполагалось использование КА с комбинированной двигательной установкой, включающей в себя двигатели малой тяги (МТ). Маневры у Марса и этап возвращения реализовывались с использованием двигателей большой тяги (БТ). В последующем, при реализации проекта, от перспективной схемы комбинирования двигателей БТ и МТ отказались, однако проблема построения и оптимизации комбинированных схем межорбитальных перелетов остается. Такие задачи известны давно. Эффективность использования МТ при исследовании межпланетных экспедиций в упрощенных постановках неоднократно отмечалась.

В настоящей работе предполагается, что КА стартует с орбиты искусственного спутника Земли, соответствующей выведению с Байконура, с 2020 по 2030 г. и прилетает на Фобос. Общая продолжительность экспедиции ограничена. Положение Земли, Марса и Фобоса соответствует эфемеридам DE424 и MAR097. Гравитационные поля Солнца, Земли и Марса считаются центральными ньютоновскими. Предполагается, что КА

и Фобос представляют из себя непритягивающие материальные точки, их координаты и скорости в конечный момент времени совпадают. Перелет рассматривается в трех различных системах координат. Моменты старта и финиша КА оптимизируются. КА оснащен двигателями БТ и МТ, управление осуществляется величиной и направлением вектора реактивной тяги. После отработки очередной двигательной установки, она сбрасывается, сброс происходит мгновенно. Угловое положение КА на исходной стартовой окружности, моменты включения, выключения тяги оптимизируются. Минимизируются затраты массы.

Задача формализуется как задача оптимального управления совокупностью динамических систем и решается на основе принципа максимума Понтрягина. Шеститочечная краевая задача сводится к двухточечной и решается численно методом стрельбы. При построении экстремали используется внешняя оптимизация градиентными методами. Одной из трудностей, которые приходится преодолеть в ходе решения является перестройка структуры траектории. Производится сквозная оптимизация по параметрам задачи. Оценивается возможный выигрыш при использовании комбинированной тяги по сравнению с использованием лишь двигателей БТ. Приводятся конкретные численные результаты.

В работе рассмотрены математические проблемы решения задач оптимального управления межпланетными перелетами КА. Рассмотрение сложных задач траекторной оптимизации, требующих для своего решения синтеза методов локальной и многоэкстремальной оптимизации, оптимального управления, космодинамики, механики космического полета, небесной механики и численных методов, дает значительный вклад в теорию решения таких задач.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ С ОГРАНИЧЕННОЙ ТЯГОЙ В ЗАДАЧАХ С ФАЗИРОВКОЙ

А.С. Самохин [1,2], *М.А. Самохина* [1,2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]РУДН, Москва

Рассматривается задача оптимизации экспедиции межпланетного пространственного перелета космического аппарата (КА). Предполагается, что на одном из концов есть жесткое условие фазировки – КА должен отстыковаться или пристыковаться к имеющейся станции или сесть на/взлететь с естественного спутника планеты. На другом конце рассматривается условие попадания в точку. Гравитационные поля Солнца и планеты на конце с жестким условием фазировки считаются центральными ньютоновскими. КА и станция или естественный спутник планеты полагаются непритягивающими материальными точками, их координаты и скорости в момент стыковки совпадают. КА управляется двигателями большой тяги. Угловое положение КА на исходной стартовой окружности, моменты включения, выключения тяги оптимизируются. Минимизируются затраты массы.

Рассматриваемая задача формализуется как задача оптимального управления и решается на основе принципа максимума Понтрягина. Краевая задача решается численно методом стрельбы с использованием модифицированного метода Ньютона и метода продолжения решения по параметру. Одной из основных трудностей при решении таких задач является построение хорошего начального приближения.

В работе рассматривается методика построения экстремалей с ограниченной тягой при условиях фазировки на примере задачи возврата КА с грунтом со спутника Марса

Фобоса к Земле с учетом эфемерид. Исходная задача многоэкстремальна, окна старта к Земле с Марса открываются каждые два года. Кроме того, для каждого витка Фобоса вокруг Марса есть своя локально-оптимальная траектория. Поэтому вначале производится глобальная оптимизация.

Для этого задача построения траектории перелета приближается серией задач Ламберта с рассмотрением разного числа импульсов в сфере действия Марса. Производится анализ, показывающий лучшие годы для старта КА среди ближайших лет, и их функционал сравнивается с абсолютным минимумом маневра.

Затем задача решается в импульсной постановке на основе принципа Лагранжа. Производится пересчет для сопряженных переменных. В такой постановке на каждом участке траектории учитывается притяжение и Солнца, и Марса.

После этого на основе импульсного решения строится экстремаль с ограниченной тягой в исходной задаче с использованием принципа максимума. При этом для оптимизации времени на конце с условиями попадания в точку оказываются удачными для счета условия трансверсальности принципа максимума, а для оптимизации времени на конце с условием фазировки – внешняя оптимизация с использованием комбинации градиентных методов и метода продолжения решения по параметру.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ БАЛКИ С РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНОЙ ПРИ СТЕСНЕННОМ ИЗГИБЕ

А.Н. Сахаров [1], *Э.Т. Хабибулин* [1], *П.В. Чистяков* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Для решения практически важных задач определения несущей способности плавающего покрова морского льда при выгрузке оборудования на лед или о всплытии подводной лодки в сплошном льду, D. Sodhi предложил проводить in situ испытание на трехточечный изгиб балки, получаемой двумя параллельными вырезами из ледового слоя и продолжающей сопрягаться с ним по торцам. В процессе испытания выявляется многостадийный характер деформирования: поперечный изгиб после образования трещины по центру балки сменяется на продольно-поперечный изгиб вследствие возникающего распора. После образования двух корневых трещин балка превращается в механизм, несущая способность которого продолжает оставаться высокой.

Для детального изучения влияния стесняющего фактора на процессы разрушения были изготовлены и испытаны на трех- и четырехточечный изгибы со стеснением специально разработанные образцы балок из ПММА (оргстекло). С помощью тензометрирования в экспериментах, проведенных в НИИ механики МГУ, измерялись усилия распора и изгибающий момент, как функция нагрузки.

В опытах обнаружено любопытное свойство начального деформирования образца – если надрез в балке отсутствует или неглубок (отношение глубины надреза к высоте балки меньше 0,4), то вертикальная нагрузка уравновешивается без возникновения распора. При более глубоком надрезе в образце возникают усилия распора, монотонно растущие с нагрузкой. Проведенные расчеты позволяют толковать наблюдаемый эффект как потерю устойчивости чисто изгибной формы равновесия и переход к продольно-поперечному изгибу.

Ключевым вопросом изучения является анализ условий, при которых возможен устойчивый (квазистатический) и неустойчивый (динамический) процесс развития трещины в образце. В работе применен энергетический подход, когда для ответа на вопрос

об условиях осуществимости устойчивого роста трещины выполняется расчет баланса работы внешней силы и полной энергии системы с учетом упругой энергии образца и энергия трещины по Гриффитцу.

С помощью тензометрирования удалось зафиксировать динамический процесс, сопровождающий неустойчивый рост трещины и определить его параметры. Несмотря на отсутствие в механической системе вязких элементов, процесс перехода является периодическим с большим декрементом затухания. Возможно, что такой характер затухания может быть объяснен с позиций двух связанных процессов – уменьшения жесткости системы за счет роста трещины и образования новых поверхностей, определяющих скорость потребления энергии.

ОБОБЩЕНИЕ ФОРМУЛЫ РЭЛЕЯ НА СЛУЧАЙ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ С УЧЕТОМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

А.Н. Сахаров [1], *П.В. Чистяков* [2], *А. Шеленков* [1]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

В работе рассмотрено обобщение формулы Релея для определения частоты первой моды колебаний упругого стержня. Учет действия консервативной нагрузки – силы тяжести – переводит задачу о поперечных колебаниях упругого стержня к задаче о продольно-поперечных колебаниях. В задаче появляется дополнительный безразмерный параметр отношения длины стержня к критической длине, при которой стержень с такими же параметрами сечения и модулем Юнга теряет устойчивость. С помощью решения задачи о колебаниях в рядах получена формула, определяющая поправку в формулу для частоты колебаний с учетом веса стержня.

Доказана самосопряженность краевой задачи поперечных колебаний при действии на стержень консервативной нагрузки. Получено обобщение функционального неравенства Релея для оценки частоты первой (основной) моды колебаний.

ВОЛНОВЫЕ РЕЖИМЫ В ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В МИКРОКАНАЛАХ

Г.М. Сисоев[1], *К.Дж. Беннетт*[2]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Университет Кранфилда, Кранфилд (Великобритания)

Рассматриваются двухслойные течения в микроканалах под действием силы тяжести или градиента давления. Жидкости в слоях предполагаются несжимаемыми, вязкими и несмешивающимися, учитывается поверхностное натяжение на межфазной границе. Показано, что в условиях многих экспериментов значения параметров подобия позволяют решать задачу в рамках модели пограничного слоя с самоиндуцированным давлением. В обоих случаях последующее применение интегрального метода приводит к системам эволюционных уравнений. В рамках этих уравнений найдены решения в форме установившихся волн в классах уединенных и периодических решений, а также в классе локализованных волн повышения и понижения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ В ПОТОКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ

М.Н. Смирнова, В.В. Тюренкова

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В данной работе представлены точные решения задачи о распространении пламени по поверхности горючего материала в потоке окислителя. Моделирование рассматриваемого процесса является основополагающим при изучении гибридных двигателей, поскольку существенно отличается от горения классических жидких струй.

Отдельного рассмотрения требует распространение пламени в условиях микрогравитации. При этом основными факторами, влияющими на данный процесс, являются воздушные потоки в атмосфере станции, а также тепловые потоки в материалах внутренних покрытий. Рассматриваемое явление является наименее изученным, но особенно важным для обеспечения пожаробезопасности на Международной космической станции. Для исследования процесса горения в условиях микрогравитации NASA совместно с Европейским космическим агентством и группой специалистов, в которую входят ученые из России, провело серию экспериментов под названием «Saffire-1». В рамках данной программы была создана экспериментальная установка по моделированию зажигания и распространения пламени по образцу материала, которая была помещена в специализированный блок «Cygnus». Далее скомплектованный блок, который был доставлен на МКС, отделился от станции, и начался эксперимент по горению. Полученные в ходе эксперимента данные были переданы в центр NASA, а блок «Cygnus» сгорел в атмосфере Земли.

Авторами рассматривается горение поверхности материала в потоке окислителя в рамках теории пограничного слоя. Предполагается, что режим горения газофазный, и химические реакции происходят на поверхности диффузионного пламени. Исследуется скорость выгорания поверхности материала при турбулентном и ламинарном режимах течения.

Полученные в работе точные решения могут быть использованы для верификации вычислительных программных комплексов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-07-00549).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОБЛАКОМ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

О.Г. Сутырин

НИИ механики МГУ, Москва

Задачи о движении ударных волн по неоднородно запыленным газам широко распространены в промышленности и технике. Важными примерами проявления таких течений являются взрывобезопасность угольных шахт и хранилищ порошковых веществ, а также импульсно-взрывные методы нанесения мелкодисперсных покрытий. Ключевую роль играет взаимодействие ударных волн с локальными и протяженными облаками взвешенных частиц. Экспериментальные данные показывают, что при таком взаимодействии формируется отраженная ударная волна, облако частиц существенно деформируется и неравномерно ускоряется, а также формируются неоднородные потоки и струи частиц, причем существенную роль играет начальная форма облака. Участки ударной волны, огибающие облако частиц снаружи, обгоняют волну внутри последнего,

что приводит к формированию и последующему отражению поперечных ударных волн. Данный эффект «фокусировки» падающей волны в случае горючих пылевых частиц может привести к инициированию горения и детонации.

В работе численно моделируется взаимодействие ударной волны с цилиндрическим облаком кварцевой пыли небольшой концентрации. Используется равновесная модель пылегазовой смеси, построенная на основе уравнений Эйлера для плоских двумерных нестационарных течений смеси совершенных газов. Описаны процессы преломления падающей ударной волны, а также формирования и отражения поперечных скачков уплотнения. Обнаружены два качественно различных режима взаимодействия – внешний и внутренний. При внешнем режиме фокусировки, реализующемся при меньших значениях концентрации пыли, пиковое давление газа достигается в момент достижения плоскости симметрии поперечными скачками после выхода волны из облака. При внутреннем режиме, реализующемся для бóльших значений концентрации пыли, фокусировка скачков уплотнения происходит в локальной области внутри пылевого облака. Определена зависимость положения пиковой точки фокусировки и относительной интенсивности фокусировки волн от объемной концентрации пыли в облаке в диапазоне от 0,01 до 0,15 % для чисел Маха ударной волны, равных 2 и 3. При повышении концентрации пыли точка фокусировки приближается к границе и смещается внутрь облака. Интенсивность фокусировки возрастает немонотонно: пиковое давление фокусировки существенно увеличивается по мере приближения точки фокусировки к границе облака, затем уменьшается и снова возрастает при переходе к внутреннему режиму взаимодействия. Немонотонность графика пикового давления сильнее выражена для меньшего из двух исследованных чисел Маха.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова при поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

ПОИСК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

В.В. Терауд

НИИ механики МГУ, Москва

В процессе высокотемпературных испытаний при ползучести проведен анализ процесса локализации деформаций в образцах из сплава Д16Т вплоть до разрушения. Рассмотрены образцы круглого и прямоугольного поперечных сечений, растягиваемые при постоянной нагрузке и постоянной температуре 400 °С. Особенности деформирования образцов в каждом эксперименте подробно записывались, после этого полученные данные анализировались с помощью специальной программы. В результате были получены закономерности изменения формы рабочих частей образцов во времени. По этим данным при помощи ряда критериев на каждом образце был зафиксирован момент времени, в который образуется шейка.

В качестве первого критерия рассматривалась разность максимального $d_{\max}(t)$ и минимального $d_{\min}(t)$ диаметров образца. Второй критерий характеризуется тем, что вычисляется среднеарифметическое значение поперечного размера образца и от этого значения определяется максимальное отклонение. Если абсолютная величина разности этих величин достигает критической величины, то считается, что появилась шейка.

Сложность использования данных критериев заключается в том, что необходимо установить пороговые значения, которые следует считать критическими. Как показало исследование, в каждом эксперименте эти значения свои и универсальную величину подобрать невозможно.

Рабочие варианты критериев удалось получить при введении в рассмотрение однородно деформирующегося образца, т.е. «мнимого» образца, который деформируется по тому же закону изменения длины образца, но сохраняет однородную деформацию во всем образце.

Для этих критериев было получено, что при небольшом пороговом значении отношение времени локализации составляет около 65-80 % от времени до разрушения, а для большого порогового значения это отношение увеличивается до 85 %. По визуальному способу определения момента образования шейки относительное время локализации составляет 53 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-38-60200; 17-08-00210).

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ЭЛЕКТРОКАПИЛЛЯРНЫЙ ДРЕЙФ НЕВЕСОМОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ КАПЛИ

Е.В. Тимохин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

Существует классическая задача об электрокапиллярном дрейфе сферической хорошо проводящей капли в растворе электролита при наличии постоянного внешнего электрического поля. Основной целью в задаче является поиск скорости движения такой капли в зависимости от заданных напряженности электрического поля, параметров среды и капли. Задача появилась как модель для описания экспериментов с аналогичной каплей ртути в растворе электролита. Основная причина движения капли состоит в том, что под влиянием внешнего электрического поля происходит изменение разности потенциалов вдоль границы ртуть – раствор электролита. Исходное распределение контактного потенциала, возникающего при соприкосновении двух сред, теряет сферическую симметрию при наложении внешнего электрического поля. Возникает градиент скачка потенциала вдоль границы, что приводит к изменению поверхностного натяжения капли. Данная связь выявлена в конце XVIII в. и в формульном выражении носит название соотношение Липпмана – Гельмгольца – Гиббса. Как результат изменения поверхностного натяжения возникает самодвижение капли, называемое электрокапиллярным дрейфом.

В работе представлена задача о нестационарном движении сферической капли. Капля находится под действием внешнего переменного электрического поля, которое создает изменение разности потенциалов на границе капли. За счет этого изменения возникает плавание капли в направлении коллинеарном направлению внешнего поля. Вещество капли и окружающей ее среды представляют собой вязкие электропроводные несжимаемые жидкости. Предполагается, что электропроводность среды внутри капли намного больше электропроводность среды снаружи. Рассматривается процесс, когда силами инерции можно пренебречь по сравнению с силами вязкости, т.е. малом числе Рейнольдса. В этом случае для описания движения жидкостей справедливы уравнения гидродинамики в приближении Стокса. При решении задачи используется метод, основанный на существовании скалярной функции, единственным образом описывающей трехмерное течение. Как решения, получены распределение скоростей, давления и потенциала в любой точки системы. Также найдено выражение для скорости движения

самой капли в зависимости от амплитуды внешнего электрического поля и получено предельное выражение для сравнительного анализа.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТЕОРОВ ДЛЯ ЕДИНОГО (НЕДРОБЯЩЕГОСЯ) ТЕЛА С ПОТЕРЕЙ МАССЫ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УНОСА МАССЫ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ (ПРОИЗВОЛЬНОЙ) АТМОСФЕРЕ

Г.А. Тирский

НИИ механики МГУ, Москва

Получено аналитическое решение двух совместных обыкновенных дифференциальных уравнений физической теории метеоров: уравнения движения центра масс метеороида (уравнения торможения), уравнения теплового баланса (уравнения уноса массы), уравнения свечения и уравнение ионизационного следа. Решение получено при предположении прямолинейной траектории и степенной зависимости параметра уноса массы от скорости метеороида для произвольной атмосферы. С помощью интеграла масс из уравнения движения исключается масса метеороида, которое затем интегрируется и дает решение в виде зависимости безразмерной плотности (высоты) атмосферы от интегральной показательной функции, зависящей от одного безразмерного параметра задачи: произведения параметра уноса массы на начальною скорость метеороида в квадрате. Это универсальное решение может быть затабулировано в виде скорости от безразмерной плотности, содержащее один параметр. При малом отличии скорости входа в атмосферу от начальной получено линейное решение в явном виде для скорости от безразмерной плотности. Используя решение для скорости выписываются выражения для переменной массы метеороида от безразмерной плотности. Получено важное следствие: относительный унос массы всегда больше относительной потери скорости метеороида. С использованием полученного решения вычисляются светимость и степень ионизации следа в явном виде от плотности (высоты) атмосферы. Приводятся формулы для плотности (высоты) максимального свечения и степени ионизации следа, а также их максимальные значения.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ О ФОРМЕ ВОРОНОК ВЫБРОСА ПРИ ВЗРЫВЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИЛИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ЗАРЯДОВ

С.Л. Толоконников

Механико-математический факультет МГУ, Москва

При решении задач о взрыве в грунте широкое распространение имеет подход, основанный на модели идеальной несжимаемой жидкости. При этом используется импульсная постановка, в которой действие заряда определяется импульсом давления. В случае «шнурового» заряда, имеющего значительную протяженность, задача может рассматриваться как плоская. В так называемой «твердо-жидкостной» модели делается дополнительное предположение о постоянстве модуля скорости на границе образующейся при взрыве воронки выброса.

В этом случае имеет место классическая постановка теории струй идеальной жидкости. Для решения указанных задач в ряде случаев может эффективно использоваться

метод особых точек С.А. Чаплыгина, имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими подходами.

В качестве примера приводится решение задачи о форме воронки выброса при поверхностном взрыве плоского заряда. Обсуждается класс задач, допускающих решение с использованием метода особых точек.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00519; 15-01-00361).

ИНТЕГРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Нгуен Тхань Тунг [1], *Д.В. Тарлаковский* [1,2]

[1]НИУ МАИ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

При исследовании задач о нестационарных процессах в электромагнитоупругих телах возникает необходимость иметь решения вспомогательной задачи об определении характеристик электромагнитного поля по заданному закону движения. Этот вопрос рассматривается применительно к полуплоскости, материал которой является однородным анизотропным проводником. С использованием метода малого параметра, преобразований Лапласа и Фурье построены интегральные представления характеристик электромагнитного поля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-00788).

О ВОЗМОЖНОСТИ МОДИФИКАЦИИ СООТНОШЕНИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

З.Г. Тунгускова, *А.С. Финошкина*

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В данной работе для построения определяющих соотношений деформируемой среды при больших деформациях используется подход, в котором классические модели для малых деформаций обобщаются на большие с помощью объективных производных. В работах Г.Л. Бровко и А.С. Финошкиной обосновано использование неголономных коротационных производных для описания пластической деформации материалов, а также предложен новый класс таких производных, непрерывным образом зависящий от двух параметров. Представлены математически корректные виды уравнений состояния в правой и левой мерах при больших деформациях для таких моделей сред, как: гипоупругость, теория пластического течения с изотропным упрочнением, с кинематическим упрочнением, с изотропно-кинематическим упрочнением, модель пластического течения с трехчленным дифференциальным уравнением для центра поверхности текучести. Для таких моделей, как обобщение теории малых упругопластических деформаций и процессов малой кривизны, в которые не входят в правых мерах производные по времени, показано, что в уравнениях в левых мерах тензор деформаций заменяется левым логарифмическим тензором Генки для простых процессов.

Выбор той и ли иной объективной производной определяется из эксперимента, который связан с определенной кинематикой. Поэтому существенным звеном этого

выбора является теоретическое решение задачи об определении напряженного состояния, возникающего при движении, достаточно точно воспроизводящем экспериментальное. При этом однородное напряженное состояние, что является существенным для расшифровки эксперимента, возникает только в случае одноосного растяжения (или сжатия) или в случае простого сдвига. Коротационная производная «нечувствительна» к одноосному растяжению, а состояние простого сдвига в эксперименте реализуется для малых деформациях при кручении тонкостенного цилиндра. Такой эксперимент для больших деформаций осуществить невозможно. На основании точного решения задачи о кручении для некоторых из класса предложенных коротационных производных предлагается методика использования эксперимента о кручении сплошного цилиндрического образца для получения входящих в определяющее соотношение функций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-06669).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СХЕМЫ С.К. ГОДУНОВА

Ю.В. Туник

НИИ механики МГУ, Москва

В работе предлагается модификация схемы С.К. Годунова, построенная на основе схемы В.П. Колгана второго порядка точности по пространственным переменным на гладких решениях. Применительно к системе дифференциальных уравнений, описывающих распространение плоских звуковых волн в покоящейся газовой среде, исследуются такие свойства полученной схемы Годунова – Колгана, как монотонность и неубывание энтропии. Схема используется для решения задач обтекания сверхзвуковым потоком плоского прямоугольного выступа и стабилизации детонационного горения водородно-воздушной смеси в конвергентно-дивергентном сопловом канале.

В рамках принятых моделей газодинамики и кинетики химических реакций показана возможность стабилизации детонационного горения водородно-воздушных смесей, поступающих с высокой сверхзвуковой скоростью в осесимметричный конвергентно – дивергентный сопловой канал в условиях, характерных для атмосферы на высотах до 30 км. Схема Колгана обеспечивает более высокую детализацию картины течения по сравнению со схемой Годунова. В то же время в процессе установления схема Колгана не гарантирует физически оправданные решения.

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ЭЛЕКТРОВРАЩЕНИЕ КАПЛИ ВЯЗКОЙ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А.Н. Тятюшкин

НИИ механики МГУ, Москва

Теоретически исследуется изменение формы капли вязкой слабопроводящей поляризующейся жидкости, взвешенной в несмешивающейся с ней вязкой слабопроводящей поляризующейся жидкости, в постоянном электрическом поле. Под действием приложенного электрического поля в капле и в окружающей ее жидкости

возникают электрогидродинамические течения. Кроме того, при определенных условиях имеет место электровращение капли. В результате в постоянном электрическом поле капля, деформируясь, либо стремиться принять некоторую стационарную форму, либо совершает деформационные колебания.

Аналитически решается задача о неустановившемся электрогидродинамическом течении внутри и вне капли и ее электровращении в приложенном однородном постоянном электрическом поле с учетом влияния как поверхностного тока проводимости, так и поверхностного конвективного электротока. Отношение вязкости капли к вязкости окружающей жидкости считается достаточно большим. Рассматриваются малые нестационарные деформации с достаточно большим характерным временем, для которых можно считать каплю сферической и использовать приближения квазистационарного электрического поля и квазиустановившегося течения при расчете электрического поля и электрогидродинамического течения. Потенциал электрического поля, а также скорость и давление в электрогидродинамическом течении представлены в виде рядов с зависящими от времени скалярными, векторными и тензорными коэффициентами, которые ищутся в виде асимптотических разложений по малому параметру, соответствующему большому отношению вязкости жидкости капли к вязкости окружающей ее жидкости. Для нулевого приближения и поправок первого и второго порядка получены либо явные выражения, либо обыкновенные дифференциальные уравнения. Найдены стационарные решения этих уравнений и проведено исследование их устойчивости. Данное исследование показало, что когда выполняются условия для законности используемых при решении задачи приближений, капля не совершает деформационных колебаний, а стремится принять некоторую стационарную форму.

С точностью до членов первого порядка по малому параметру найдены стационарные угловая скорость электровращения и электрические дипольный и октупольный моменты капли. Обнаружено, что стационарная поправка первого порядка к дипольному моменту капли определяется не только напряженностью приложенного поля и параметрами жидкостей, но также и процессом изменения со временем дипольного момента нулевого порядка. Таким образом, зависимость дипольного момента от напряженности приложенного поля имеет гистерезис даже при очень медленных изменениях напряженности. Установлено, что с точностью до членов первого порядка капля принимает форму эллипсоида общего вида. С точностью до членов второго порядка капля принимает форму, которая описывается уравнением четвертого порядка, причем имеет место гистерезисная зависимость этой формы от напряженности приложенного поля. Гистерезисная зависимость формы капли от напряженности приложенного поля наблюдалась в экспериментах по электровращению с каплями, в которых отношение вязкости капли к вязкости окружающей жидкости было не слишком большим.

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00157; 14-01-00056).

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИНКИ, ГЛИССИРУЮЩЕЙ ПО МЕЛКОЙ ВОДЕ

Е.В. Филатов, А.Ю. Якимов

НИИ механики МГУ, Москва

Аналитически получена приближенная формула для сопротивления пластинки, глиссирующей по поверхности жидкости конечной глубины с околокритической

скоростью и с малыми углами глиссирования, при линейном поле скоростей и без учета импульса возвратной струи.

Были проведены численные эксперименты с использованием программного комплекса XFlow^{TM}, показавшие хорошее совпадение теории и эксперимента в представленных диапазонах задаваемых параметров.

Волнообразование около пластинки в численных экспериментах совпало с наблюдениями в гидроканале.

СОЗДАНИЕ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ МАКРОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОСТНОЙ ИНЖЕНЕРИИ МЕТОДОМ КОЛЛОИДНОГО ФОРМОВАНИЯ

Я.Ю. Филиппов, В.К. Ковальков, В.И. Путляев

НИИ механики МГУ, Москва

Наиболее интересными материалами для замещения поврежденных участков костной ткани являются биорезорбируемые материалы, использование которых подразумевает полную интеграцию биоактивного материала в структуру костной ткани. При этом на передний план выходит такой параметр, как остеокондуктивность, т.е. способность стимулировать прорастание костной ткани вглубь имплантата, которая неразрывно связана с наличием связанной системы макропор необходимого диаметра.

В рамках данной работы применялся метод удаляемой добавки, в качестве которой использовали напечатанные на 3D-принтере структуры на основе поливинилстирола. В качестве исходного порошкового прекурсора была выбрана высокотемпературная «А-фаза» состава $Ca_{2,5}Na(PO_4)_2$, которую смешивали с необходимым количеством дигидрофосфата натрия и затворяли раствором глицерина различной концентрации. Полученную пасту использовали для заполнения полимерного темплата, после чего производили термическое разложение полимера с последующим спеканием материала.

В ходе работы было показано, что оптимальная для работы концентрация глицерина составляет 60 масс.%, что соответствует схватыванию в течение 30 мин, которых достаточно для манипуляции с пастой. Изучен процесс спекания керамического материала, представленного смесью пирофосфата кальция/смешанного пирофосфата натрия-кальция, близкой к эвтектическому составу с температурой плавления 800 ^{o}C. Показано, что оптимальная температура отжига составляет 775-790 ^{o}C, так как при более низких температурах спекание протекает недостаточно эффективно, а при более высоких конструкция теряет заданную форму вследствие возможного образования жидкой фазы.

В ходе механических испытаний было показано, что твердеющая цементная паста обладает прочностью порядка 5,5 МПа, достаточной для сохранения формы конструкции в процессе выжигания полимера. Получаемая плотная керамика имеет невысокую прочность порядка 30 МПа и плотность ~72 % теоретической, что говорит о возможности оптимизации процесса спекания. Также удалось получить конструкции с объемом пор до 80 % и прочностью ~0,8 МПа, которые не могут быть использованы в качестве элементов, несущих механическую нагрузку, однако способны эффективно способствовать прорастанию костной ткани при экранировании напряжения.

О ФОРМИРОВАНИИ И ОБРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МАХОВСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ АВТОМОДЕЛЬНОМ ОТРАЖЕНИИ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ОТ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.П. Фокеев

НИИ механики МГУ, Москва

В работе исследуется автомодельное маховское отражение сильной ударной волны от плоской отражающей поверхности (клина) в однородном газе. На основании собственных и привлеченных из имеющихся в литературе экспериментальных данных выявлена особенность эволюции маховского отражения вблизи перехода к регулярному отражению. Эта особенность проявляется как нарушение основной закономерности эволюции маховского отражения, заключающейся в росте угла наклона траектории тройной точки маховской конфигурации и одновременном уменьшении ее высоты при росте наклона отражающей поверхности (относительно вектора скорости падающей ударной волны). Эксперименты в ударных трубах показали, что наклон траектории тройной точки достигает значения, соответствующего предельному углу перехода к регулярному отражению до достижения угла клина этого же значения, и «замораживается» в этом положении при дальнейшем росте угла клина вплоть до достижения им предельного угла перехода к регулярному отражению. Такое парадоксальное поведение маховского отражения, когда изменение граничных условий (рост угла клина) не сопровождается изменением параметров трехударной конфигурации (траектории тройной точки), может быть следствием формирования газовой неоднородности, а именно пограничного слоя, за маховским стеблем. Роль пограничного слоя ранее была выявлена при экспериментальном исследовании маховского парадокса, заключающегося в смещении границы области существования регулярного отражения в область маховского отражения. Сложная задача рассмотрения начала формирования пограничного слоя в окрестности пересечения падающей и регулярно отраженной ударных волн объясняет отсутствие численных исследований этого явления. Маховское отражение с формированием пограничного слоя за маховским стеблем представляет собой пример классической задачи для рассмотрения ее численными методами.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект № НШ-8425.2016.1), РНФ (проект № 14-19-01759) и РФФИ (проект № 16-29-01092).

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

Д.Е. Хазов, А.Г. Здитовец

НИИ механики МГУ, Москва

Рассматриваются результаты численно-экспериментального исследования газодинамического метода безмашинного энергоразделения сверхзвукового газового потока. Данный метод и устройство для его реализации были впервые предложены А.И. Леонтьевым в 1997 г. Он основан на эффекте перераспределения полной энтальпии (температуры) в пограничном слое, возникающем на обтекаемом теплоизолированном

теле. Если представить себе теплообменный аппарат «труба в трубе», в котором по внутреннему каналу поток движется со сверхзвуковой скоростью, а по внешнему – с дозвуковой и потоки имеют одинаковую начальную температуру, то благодаря данному эффекту температура газа в пристенном слое со стороны дозвукового потока будет выше, чем со стороны сверхзвукового. Следовательно, возникнет тепловой поток от дозвукового потока к сверхзвуковому. Таким образом, дозвуковой поток будет охлаждаться, а сверхзвуковой нагреваться, т.е. будет иметь место энергоразделение.

В докладе приводятся результаты экспериментального исследования нагрева/охлаждения газового потока от массовой доли дозвукового потока, а также распределение температуры стенки и давления вдоль сверхзвукового канала.

Последовательно рассматриваются одно- и двумерные математические модели устройства, реализующего безмашинное энергоразделение. На базе полученных экспериментальных данных проводится валидация предложенных моделей.

С использованием разработанных моделей определен оптимальный с точки зрения физической реализации и эффекта энергоразделения контур сверхзвуковой части устройства.

«STEM-ОБРАЗОВАНИЕ» – НАУКА, ТЕХНОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРИЯ И МАТЕМАТИКА – ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

А.Д. Хамзаев

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В настоящее время большие потоки информации, высокотехнологичные инновации и разработки преобразовывают все сферы экономики и нашей жизни. В соответствии с этим основным трендом в мировом образовании является развитие STEM-образования (в некоторых странах используется аббревиатура STEAM, добавляется предмет – искусство).

Важность STEM-технологий и STEM-образования объясняется тем, что STEM форсирует инновации, поэтому STEM-образование тесно связано с экономическим процветанием в современной мировой экономике. Инвестиции в STEM дают широкие, проверенные экономические выгоды в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

STEM-образование основано на учебном плане, который объединяет предметы, а не изучает их отдельно. А именно, вместо того, чтобы изучать отдельно каждую из пяти дисциплин – науку, технологию, инженерию, искусство и математику, STEAM соединяет их в единую систему обучения.

Обучение STEM включает в себя несколько основанных на исследованиях передовых методов, доказавших свою эффективность в достижении успеваемости учащихся: решение нестандартных проблем; обучение в процессе решения проблем и выполнения проектов; обучение на основе вопросов, появляющихся у учеников и др. В результате учащиеся приобретают: опыт работы в команде и лидерские навыки, опыт управления проектами, креативность для решения проблем и разработки новых идей, организационные навыки для отслеживания большого количества различной информации.

В США принят Стратегический план по развитию STEM-образования (в 2013 г.). Поставлена цель подготовки к 2021 г. 100000 новых эффективных учителей для STEM-образования и оказать поддержку действующим педагогам. Уже подготовлено более 30000 новых преподавателей STEM за первые четыре года реализации плана и десятки тысяч преподавателей повысили квалификацию (100kin10.org).

В большинстве развитых стран имеются подобные национальные стратегии и инициативы.

Что касается международного сотрудничества в сфере STEM-образования, в качестве примера можно назвать совместный проект ЮНЕСКО и INTEL для Африканских стран. В частности, заседание Научного совета Международной программы по фундаментальным наукам ЮНЕСКО в январе с.г. было посвящено проблемам развития STEM-образования в мире.

ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ, ПОРОЖДАЕМЫЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИЕЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ Ю.Н. РАБОТНОВА

А.В. Хохлов

НИИ механики МГУ, Москва

Продолжен качественный анализ физически нелинейного определяющего соотношения Ю.Н. Работнова для реономных материалов, обобщающего линейное интегральное соотношение вязкоупругости Больцмана – Вольтерры посредством введения второй материальной функции (помимо ядра релаксации). При минимальных первичных ограничениях на материальные функции выведено уравнение семейства диаграмм деформирования при постоянных скоростях нагружения, порождаемых соотношением Работнова, аналитически изучены их общие качественные свойства: интервалы монотонности и выпуклости диаграмм деформирования, характер их зависимости от скорости нагружения и материальных функций, условия существования точки перегиба, существование и вид предельных кривых при стремлении скорости нагружения к нулю или бесконечности, условия отличия от нуля длительного модуля.

На основе сравнения свойств теоретических диаграмм деформирования с типичными качественными свойствами экспериментальных диаграмм вязкоупругопластичных материалов выведены минимальные ограничения на материальные функции, обеспечивающие адекватное описание основных реологических эффектов, выявлены индикаторы применимости определяющего соотношения и те эффекты, которые оно не может описать ни при каких материальных функциях (например, зависимость формы кривых релаксации от уровня деформации, отрицательная скоростная чувствительность диаграмм деформирования и др.).

Арсенал возможностей определяющего соотношения Работнова сопоставлен с арсеналом линейного интегрального определяющего соотношения вязкоупругости, указаны дополнительные эффекты, которые нелинейное соотношение Работнова способно описывать по сравнению с линейным за счет второй материальной функции. В частности, в отличие от диаграмм деформирования, порождаемых линейной теорией наследственности, которые всегда выпуклы вверх, диаграммы деформирования, порождаемые соотношением Работнова, могут иметь участки выпуклости вниз (в частности, в окрестности нуля) и точки перегиба, т.е. могут воспроизводить характерное поведение экспериментальных диаграмм большинства биологических тканей.

Результаты проведенного анализа способствуют расширению и уточнению сферы обоснованного применения определяющего соотношения Ю.Н. Работнова в моделировании поведения реономных материалов, проявляющих нелинейную наследственность, выраженную скоростную чувствительность и, возможно, разносопротивляемость: полимеров, композитов, пен, геосинтетических тканей, керамик,

асфальтобетонов, твердых топлив, связок, сухожилий, стенок сосудов и других биологических тканей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-01146).

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ МАГМЫ В КАНАЛЕ С УПРУГИМИ СТЕНКАМИ

Ю.Д. Цветкова

НИИ механики МГУ, Москва

Построена квазидвумерная модель течения магмы в канале с упругими стенками с учетом вязкости зависящей от концентрации кристаллов. Концентрация кристаллов не равновесная, что приводит к заметному росту вязкости вблизи стенок и формированию области с единичной концентрацией кристаллов. Это приводит к существенно непараболическому профилю скорости. Предполагается проскальзывание магмы по стенкам при достижении критического касательного напряжения, что наблюдается во время экструзивных извержений вулканов.

Показано, что учет влияния упругих движений пород, окружающих канал с магмой приводит к заметному уменьшению давления в очаге.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА КРУЧЕНИЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

П.В. Чистяков [1], *А.Н. Сахаров* [2], *С.В. Новотный* [1], *А.И. Жуков* [1]

[1]НИИ механики МГУ, Москва;
[2]Механико-математический факультет МГУ, Москва

Для изучения свойств современных материалов в состоянии сверхпластичности (или близком к нему) необходима установка с большим диапазоном изменения скоростей деформации. Установка должна обеспечивать равномерный нагрев образца до 1000 ^{o}C. В связи с этим была проведена дополнительная модернизация установки АК-1958. Была проведена замена устаревшей нагревательной печи на современную СТИ ТС 2/1200. Хорошая термоизоляция позволила получить более равномерный нагрев образца и убрать водяную систему охлаждения захватов. Кинематический блок на кручение, установленный ранее на этой машине, был также заменен. Новый комплект червячных редукторов (INNOVARY, Италия) позволяет легко менять коэффициент редукции более чем в 100 раз. Частотно-регулируемый привод асинхронного двигателя дает дополнительную возможность регулировки скорости вращения двигателя.

На модернизированной установке проведена серия испытаний на кручение цилиндрических (диаметр 8 мм, длина 30 мм) образцов из титанового сплава ВТ9 с исходной пластинчатой структурой. Скорость деформации (на поверхности образца) менялась от 10^{-2} до 10^{-5} с$^{-1}$. Максимальный угол закручивания 4π радиан. Показана высокая скоростная чувствительность материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-04281).

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТАНДЕМА ТЕЛ СО ЩИТКОМ В РАМКАХ URANS, RSM И DES ПОДХОДОВ К ОПИСАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

А.Ю. Чулюнин

НИИ механики МГУ, Москва

Вопросам исследования внешней аэродинамики автомобиля посвящено множество научных работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Одним из наиболее распространенных в мире тестовых примеров, используемых для верификации компьютерных технологий при численном решении задач внешней аэродинамики автомобилей, является так называемое тело Ахмеда. Этот пример удобен при отработке вычислительных технологий моделирования отрывных донных течений позади корпуса автомобиля. Однако в нем не содержится ряд важных особенностей, присущих обтеканию большегрузных автомобилей. В частности, модель «тело Ахмеда» не учитывает наличие значительного воздушного зазора между кабиной и кузовом грузовика, а также не предусматривает возможность управления обтеканием с помощью щитовых элементов, способных, в некоторых случаях, обеспечить достижение эффекта «уловленный вихрь».

В работе, в качестве альтернативной «телу Ахмеда» модели, позволяющей использовать идею «уловленного вихря», предложена конструкция, представляющая собой последовательный тандем двух параллелепипедов с шарнирно установленным щитовым экраном-интерцептором на переднем теле. Численное моделирование рассматриваемой модели проводится на базе URANS-технологии в пакетах STAR-CCM+ и OpenFOAM. В качестве варьируемых параметров используются: угол установки интерцептора, а также расстояние между телами. Для замыкания уравнений Рейнольдса используются модель турбулентности k-ω SST и модель переноса рейнольдсовых напряжений (RSM), кроме того, используется технология LES. В последнем случае применяется относительно новый подход к численному решению задач гидрогазодинамики Lattice Boltzmann Method (LBM, метод решеточных уравнений Больцмана).

В результате серии вычислительных экспериментов показано, что наличие интерцептора позволяет снизить коэффициент лобового сопротивления тела Cx0, который, при этом, достигает минимума при угле наклона интерцептора $\alpha = 30^\circ$. Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе А6 НИИ механики МГУ, показывает, что все используемые расчетные технологии дают хорошее количественное согласование при малых углах отклонения интерцептора. При критическом угле $\alpha = 30^\circ$ наилучшие результаты показывает модель RSM.

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОГНУТЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

К.В. Шалеев

НИИ Механики МГУ, Москва

Используя разработки, основанные на авторском свидетельстве № 1106432 (В.О. Герман, В.В. Калинин, Ю.П. Кукота, В. И. Залесский, Г. А. Дюжев, от 16.03.1983 г.) и работы, связанные с исследованием газопроницаемых полых электродов, изложенные в отчете НИИ механики МГУ № 5351 от 28.02.2017 г., рассматривается возможность

нанесения защитных покрытий на внутреннюю поверхность изогнутых металлических труб в условиях, при которых обрабатываемая труба остается неподвижной.

Предложен электрод типа МПК (многополостной катод), в котором предусмотрены сопла для подачи материала покрытия трубы.

Также предложены конструкция механической системы, обеспечивающей вращательное движение электрода внутри трубы, и система сбора информации о положении электрода относительно внутренней поверхности обрабатываемой трубы на основе индуктивных датчиков, а также система управления углом поворота электрода для равномерного нанесения покрытий при прохождении изогнутых участков.

Рассматривается также вариант разработки системы поворота электрода МПК на основе числового программного управления при заранее известной конфигурации трубы.

Данная работа является дальнейшим развитием разработки, изложенной в отчете НИИ механики МГУ № 5351, в которой, при нанесении покрытия на внутреннюю поверхность трубы, электрод оставался неподвижным, а вращалась сама труба.

Автор выражает благодарность В.О. Герману за постановку задачи.

НЕГЛАДКИЕ ПЕРВЫЕ ИНТЕГРАЛЫ В СИСТЕМАХ С ДИССИПАЦИЕЙ

М.В. Шамолин

НИИ механики МГУ, Москва

Как известно, понятие интегрируемости, вообще говоря, достаточно расплывчатое. При его построении необходимо учитывать, в каком смысле оно понимается, в классе каких функций ищутся первые интегралы и т.д. В данной работе принимается такой подход, который учитывает в качестве класса функций как первых интегралов трансцендентные функции. Здесь трансцендентность понимается не в смысле теории элементарных функций (например, тригонометрических), а в смысле наличия у них существенно особых точек (в силу классификации, принятой в теории функций комплексного переменного, когда функция имеет существенно особые точки).

В более ранних работах автора уже была показана полная интегрируемость уравнений пространственного движения тела в сопротивляющейся среде, когда у системы динамических уравнений существует полный набор трансцендентных первых интегралов. Здесь предполагалось, что все взаимодействие среды с телом сосредоточено на той части поверхности тела, которая имеет форму плоского (двумерного) диска. Впоследствии задача была обобщена и была исследована динамическая часть уравнений движения различных динамически симметричных четырехмерных твердых тел, где силовое поле сосредоточено на той части поверхности тела, которая имеет форму двумерного (трехмерного) диска, при этом силовое воздействие сосредоточено на двумерной плоскости (одномерной прямой), перпендикулярной данному диску. При этом рассматриваемые системы в некоторых случаях сводились к системе с диссипацией на касательном расслоении двумерной сферы.

В данной работе сначала рассматриваются уравнения геодезических на касательном расслоении гладкого двумерного многообразия (система в отсутствии внешнего поля сил). Строится переход к удобным координатам касательного пространства. В дальнейшем сначала вводятся внешние силовые поля, которые являются потенциальными, и рассматриваемые системы четвертого порядка обладают полным набором (тремя) гладких первых интегралов. А затем в таких системах вводятся дополнительные члены, в результате чего системы перестают быть консервативными, а точнее, становятся системами с так называемой знакопеременной диссипацией. При этом при некоторых

условиях они обладают полным набором (негладких) трансцендентных первых интегралов, в ряде случаев выражающихся через конечную комбинацию элементарных функций.

О ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВАХ МЕТОДА ФОТОУПРУГОСТИ

Г.З. Шарафутдинов

НИИ механики МГУ, Москва

Как известно, поляризационно-оптический метод исследования напряжений (обобщенно – метод фотоупругости) дает возможность получать количественную оценку напряженно-деформированного состояния, основываясь на измеряемых в экспериментах значениях порядков полос изохром и параметров изоклин. Указанные величины, именуемые параметрами двойного лучепреломления, характеризуют изменения значений показателей преломления по главным направлениям в плоскости фронта световой волны и собственно – эти направления.

В механике деформируемого твердого тела большой интерес представляет установление связей между процессом деформирования и изменениями состояния вещества, происходящими на микро- и мезоуровнях. В случае использования метода фотоупругости эта задача, в силу наличия связи между деформациями и напряжениями, с одной стороны, и параметрами двойного лучепреломления – с другой, может быть существенно упрощена за счет ее сведения к установлению зависимости только между показателями преломления и изменениями состояния вещества на микро- и мезоуровнях.

В работе это производится при помощи модели линейного осциллятора, описывающего поведение заряженной частицы под действием внешних полей. С ее использованием получено выражение для показателя преломления и его изменений. Показано, что при деформации материала в определенном направлении изменяется собственная частота осцилляторов, соответствующая этому направлению, а явление двойного лучепреломления возникает при этом за счет разного их изменения по различным главным направлениям, происходящего вследствие смещения дисперсионной кривой.

В работе получено также выражение оптического коэффициента деформаций через параметры потенциала парного взаимодействия Ми.

ВИЗУАЛЬНЫЙ РЕДАКТОР ОНТОЛОГИЙ НА ЯЗЫКЕ JAVASCRIPT: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

Д.А. Шачнев

НИИ механики МГУ, Москва

В докладе описан визуальный редактор онтологий, разработанный автором и используемый в ИАС ИСТИНА. Редактор может быть использован для различных целей, таких как создание и редактирование онтологии научного знания, онтологий предметных областей, онтологий курсов, читающихся в учебных заведениях. В качестве хранилища редактор использует реляционную базу данных Oracle, имеется возможность интеграции данных онтологии и прочих данных из реляционной базы. Код для взаимодействия с базой написан на языке Python с использованием фреймворка Django, интерфейс пользователя

реализован на языке JavaScript с использованием библиотеки визуализации vis.js. Редактор поддерживает систему контроля версий: для каждого изменения онтологии можно узнать внесшего это изменение пользователя, и просмотреть измененные триплеты онтологии.

Основой интерфейса редактора являются страницы онтологии: каждый пользователь может создать одну или несколько страниц, добавить туда несколько концептов из уже имеющихся в системе, после чего приступить к их изменению или добавлению новых концептов.

Редактор совместим с существующими международными стандартами для онтологий, такими как RDF Schema и Ontology Web Language. Также возможна интеграция с проектом Linking Open Data, соединяющим в себе многие крупные онтологии.

В докладе подробно рассматриваются: механизм работы системы контроля версий, механизм отправки изменений на сервер, разрешение конфликтов, синхронизация данных и возможности параллельной работы. Также приведены примеры онтологий, созданных в редакторе. Рассматриваются задачи, которые можно решить с помощью редактора в ИАС ИСТИНА: поиск записей в базе данных, описание предметных областей и описание онтологии самой системы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕГКОВОЙ ШИНЫ ПРИ СИЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

С.В. Шешенин

Механико-математический факультет МГУ, Москва

При проектировании шины приходится проводить множество экспериментов, что весьма ресурсоемко. Эксперименты можно частично заменить численным моделированием. Процесс развития моделирования шин прошел определенную историю. В настоящее время моделирование основывается на трехмерной конечно-элементной дискретизации. Поэтому вычислительные аспекты представляют значительный интерес. Это в том числе связано с контрастными свойствами резинокордных слоев, составляющих основу пневматической шины.

Тем не менее выбор адекватных механических моделей для резинокордных слоев представляет наибольшую важность. В докладе представлены трехмерные модели резинокордных слоев при малых и относительно больших деформациях. Относительно малые деформации возникают в резинокордных слоях брекера и могут описываться физически линейной теорией упругости. С использованием асимптотического метода и сравнением численного решения с данными эксперимента обосновывается, что для моделирования брекера следует применять соотношениями моментной теории упругости. Речь идет о сильном деформировании шины, возникающем в нештатных ситуациях качения, так и при специальном тестировании шин. В соответствии с моментной моделью предложена соответствующая конечно-элементная модель.

Также построена модель для случая относительно больших деформаций в рамках нелинейной анизотропной упругости. Такая модель подходит для описания резинокордных слоев каркаса.

Разработана методика определения материальных параметров с использованием численных и обычных экспериментов. Разработан и реализован численный алгоритм решения нелинейных краевых задач на базе МКЭ и создана собственная программная реализация. На ее основе создано численное моделирование шин при сильном деформировании с учетом прогрессирующего разрушения. Также обсуждаются методика решения контактной задачи при качении и алгоритм вычисления выделенного тепла.

Рассмотрена задача определения тепловыделения за счет проявления вязкоупругих свойств при стационарном и нестационарном качениях. Показано, что обобщенная модель вязкоупругости Максвелла эффективна как для описания свойств брекерной резины, так и для численной реализации. Для этого проведены статические и осцилляционные опыты в НИИ механики МГУ. Показано с помощью экспериментов, что для разумной точности достаточно аппроксимировать релаксационную кривую всего двумя членами ряда Прони. Статически опыты не позволяют определить параметры модели так, чтобы она была пригодна для реальных скоростей качения. Однако определяемые в них времена релаксации совпадают с соответствующими временами релаксации, определяемыми в осцилляционных опытах. В этом смысле статические опыты полезны для проверки результатов осцилляционных опытов. Показано, что по известной модели Максвелла для резины достаточно просто путем осреднения можно получить эффективные определяющие соотношения резинокордного материала.

Модель Максвелла обладает также тем достоинством, что может быть обобщена для учета нелинейности, наблюдаемой в опытах с брекерной резиной при деформациях до 15 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-05887).

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ТРАНСЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

А.С. Шишаева [1], *В.В. Веденеев* [1], *А.А. Аксенов* [2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва;
[2]ООО «Тесис», Москва

Аэроупругая устойчивость панелей обшивки летательных аппаратов, известная как панельный флаттер, интенсивно исследовалась многие десятилетия. При больших сверхзвуковых скоростях возникает флаттер связанного типа, в то время как при малых сверхзвуковых скоростях доминирующим является одномодовый флаттер. Исследование нелинейного развития колебаний показывает, что при трансзвуковых и малых сверхзвуковых скоростях полета имеет место сосуществование различных предельных циклов при одних и тех же условиях полета, что вызвано линейной неустойчивостью одновременно нескольких собственных мод и нелинейным взаимодействием между ними. В настоящей работе исследуется развитие нелинейных флаттерных колебаний при переменной скорости потока.

В качестве модели панели обшивки рассматривается упругая пластина, вделанная в абсолютно жесткую плоскость. Кромки пластины защемлены. С одной стороны от пластины течет идеальный совершенный газ с переменным числом Маха $\mathrm{M}(t)$. К другой стороне пластины приложено давление, равное невозмущенному давлению потока, так чтобы невозмущенное состояние пластины было плоским. Рассматривается линейное увеличение M со временем от $\mathrm{M}_1 = 0,7$ до $\mathrm{M}_2 = 1,7$ с различными ускорениями. Свойства потока газа приняты равными свойствам воздуха на высоте 11 км над уровнем моря, свойства пластины соответствуют алюминию.

Для расчета развития колебаний во времени используется связка двух кодов – Abaqus для расчета динамики пластины и FlowVision для расчета течения газа. На каждой итерации они обмениваются данными, в результате чего проводится расчет совместного движения пластины и потока. Технология расчета отработана ранее на задаче с постоянной скорости потока.

Для достаточно малых ускорений основные бифуркации в динамике пластины соответствует развитию флаттерных колебаний при постоянной скоростью потока. Для каждой бифуркации проанализированы изменения в спектре, фазовом портрете и пространственной форме колебаний.

При больших ускорениях потока некоторые предельные циклы не успевают сформироваться, в т.ч. наиболее опасные высокочастотные колебания. Однако расчеты показывают, что даже для нефизично больших ускорений (~60g) возникают одномодовые колебания, имеющие амплитуду нескольких толщин пластины.

Таким образом, практически важным является вывод о том, что проход трансзвуковой области с большим ускорением желателен не только из-за меньшего времени, проведенного в режиме трансзвукового флаттера, но из-за того, что наиболее опасные высокочастотные колебания не успевают развиться.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ № МК-5514.2016.1).

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К УПРАВЛЕНИЮ ДОКУМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

А.С. Шундеев

НИИ механики МГУ, Москва

В докладе представлены результаты исследований, связанных с построением новой модели данных. На концептуальном уровне данные моделируются корневыми помеченными деревьями. Узлы дерева могут быть двух типов – управляющие и текстовые. Текстовые узлы используются для хранения фрагментов документов. Управляющие узлы используются для задания структуры документа и разграничения доступа к его частям. Подобный подход на первый взгляд не является новым. Например, в рамках модели OEM данные представляются помеченными графами, а модель языка запросов XQuery использует древовидные данные. Однако эти модели в большей степени ориентированы на выполнение запросов типа «выборка», которые используются для получения вторичной информации из исходного набора данных. В рамках предлагаемой модели акцент делается на формирование данных, поддержание их в целостном состоянии и генерации целевого представления данных (например, в виде документа в формате DOCX). Это последнее свойство делает представляемую модель данных похожей на технологию DocBook.

Управляющие узлы позволяют организовать разграничение доступа к данным для разных пользователей. Тем самым может быть организован поток работ между пользователями, в рамках которого осуществляется параллельная обработка отдельных составных частей целевых документов. Таким образом, предлагаемая модель данных может рассматриваться (с определенными оговорками) как вариант технологии автоматизации бизнес-процессов.

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СКЛОНОВЫХ ПОТОКОВ

М.Э. Эглит [1], *А.Е. Якубенко* [2], *Ю.А. Дроздова* [3]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва;
[3]РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва

Склоновые потоки – это геофизические потоки, возникающие на склонах гор. Примерами склоновых потоков являются снежные лавины, сели, быстрые оползни, потоки

лавы, а также катастрофические водные потоки, образующиеся, в частности, при прорывах горных озер. Такие потоки могут представлять большую опасность для людей и различных объектов. Поэтому актуальным является создание карт опасных зон и строительство защитных сооружений. Необходимые сведения о динамических параметрах склоновых потоков могут быть получены с помощью наблюдений на местности или расчетов с использованием математических моделей. Построение современных математических моделей склоновых потоков требует учета ряда важных факторов, в числе которых: 1) захват потоком и вовлечение в движение подстилающего материала; 2) сложные реологические свойства движущейся среды, 3) процессы, происходящие на границе поток-склон, 4) возможность как ламинарного, так и турбулентного режима движения. В докладе обсуждаются проблемы, связанные с учетом этих факторов:

· механизмы захвата массы и их математическое описание;

· неньютоновские реологические свойства;

· формулировка граничных условий на дне (прилипание или проскальзывание);

· построение модели турбулентности для склоновых потоков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 15-01-08023).

СКЛОНОВЫЕ ПОТОКИ КАК ПОТОКИ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД

М.Э. Эглит [1], *А.Е. Якубенко* [2], *Т.А. Якубенко* [2]

[1]Механико-математический факультет МГУ, Москва;
[2]НИИ механики МГУ, Москва

Склоновые потоки – это потоки, возникающие на склонах гор, например снежные лавины и быстрые оползни. Они могут наносить большой ущерб объектам, оказавшимся на их пути, и приводить к гибели людей. Для оценки динамических параметров таких потоков, необходимой для организации защиты, нужны математические модели, в частности уравнения, определяющие реологические свойства движущейся среды. Простейшей реологической моделью является модель ньютоновской вязкой жидкости. Однако она не может описать явление остановки лавины или оползня на наклонном склоне, что часто имеет место. Это явление означает, что материал потока обладает пределом текучести. В докладе сравниваются результаты расчетов потоков на длинных однородных склонах линейно-вязкой среды и сред, обладающих пределом текучести, в частности бингамовской среды и сред Хершеля – Балкли с различными значениями степенного индекса. В расчетах учитывалась возможность захвата потоками подстилающего склонового материала. Исследовались ламинарные и турбулентные потоки. Независимо от режима течения и от реологических свойств движущихся сред, при движении по длинному однородному склону при наличии захвата подстилающего материала толщина потока и средняя по глубине скорость растут. Если толщина доступного для вовлечения слоя достаточно велика и захват продолжается долго, то зависимость скорости и толщины от времени приближается к линейной, а скорость захвата стремится к константе. Скорость захвата турбулентными потоками оказывается на порядок выше, чем ламинарными. При одинаковых начальных условиях и величинах коэффициента вязкости в турбулентном бингамовском потоке скорости меньше, чем в линейно-вязком, захват склонового материала начинается позже, скорость захвата меньше. При этом в потоке бингамовской среды с увеличением массы потока за счет захвата подстилающего материала влияние предела текучести на величину скорости захвата

уменьшается, так что предельные значения скорости захвата при разных величинах предела текучести оказываются близкими.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-01-00361; 15-01-08023).

МЕТОД СОБЫТИЙНОГО МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

А.Н. Якунчиков

Механико-математический факультет МГУ, Москва;
НИИ механики МГУ, Москва

В работе развиты подходы событийного молекулярно-динамического моделирования применительно к решению задач динамики разреженного газа. Сильными сторонами разработанного метода является бессеточность, отсутствие стохастичности при моделировании межмолекулярных столкновений (по сравнению с методом прямого статистического моделирования Монте-Карло) и существенное снижение вычислительной нагрузки по сравнению с классическим молекулярно-динамическим моделированием.

Метод протестирован на задаче о переходном течении газа в плоском канале под действием перепада давления. Рассчитан массовый расход через канал в широком диапазоне чисел Кнудсена. Полученные результаты согласуются с результатами численного решения модельного уравнения Больцмана (BGK) для каналов конечной длины. В ходе тестовых расчетов определены значения параметров метода, при которых скорость вычислений достигает своего максимума.

С помощью разработанного метода рассмотрено несколько классических задач динамики разреженного газа (задача о теплопередаче между двумя пластинами, задача о сверхзвуковом обтекании цилиндра) и решена новая задача о сверхзвуковом движении цилиндра в канале, наполненном разреженным газом. Получены поля плотности, скорости, температуры и напряжений в системе, рассчитаны коэффициенты сопротивления и теплового потока для обтекаемого тела.

Расчеты проведены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В.Ломоносова и МСЦ РАН.

ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ С НЕСЖИМАЕМОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ

Я.Д. Янков

Механико-математический факультет МГУ, Москва

В докладе обсуждается возможность построения математической модели дисперсных систем с постоянном объемном содержанием дисперсной фазы с целью применения к проблемам теории псевдоожиженного слоя, теории фильтрации и другие области науки. Сформулированы основные принципы и макроскопические уравнения, а также найдены некоторые их решения, имеющие важное научное и практическое значение.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Е.А. Абросимова 139
А.И. Агеев 19
Г.М. Азанов 19,20
А.А. Аксенов 197
А.В. Аксенов 21
Д.Е. Александров 21
А.И. Алексюк 22
П.Р. Андронов 22
С.И. Арафайлов 23
А.А. Артемов 56
А.М. Арутюнян 24
Е.А. Архангельский 80
Е.С. Асмолов 25
А.А. Афанасьев 25
С.А. Афонин 26,112
Н.Е. Афонина 131,132,133,134
А.Ф. Ахметгалеев 27
Д.О. Бабаева 28
Ф.Ю. Бакланов 28
А.А. Балуев 29
А.Н. Белоглазкин 30
Д.Ю. Белова 29
А.П. Беляев 31,151
Н.А. Беляев 31
Т.А. Белякова 31,151
К.Дж. Беннетт 180
А.Н. Богданов 32
В.В. Боголепов 32
И.И. Богомолов 26
А.В. Бойко 33,80
В.Г. Бойков 34
Ю.В. Болотин 34
В.О. Бондарев 35
С.А. Боронин 36
Г.Л. Бровко 37,38
Д.А. Бровченко 38
И.Г. Брыкина 39
И.А. Брюханов 40
Д.И. Бугров 41
Н.Г. Быкова 41
Н.Г. Бычков 137
В.В. Вакулюк 42
И.А. Варламова 43
В.А. Васенин 44
Р.А. Васин 46
О.Э. Васюкова 47
Я.А. Вахтерова 47
И.И. Вдовиченко 48
В.В. Веденеев 35,84,100,168,197
А.В. Вершинин 49,50,51
И.И. Вигдорович 51
Ю.А. Виноградов 52,93,109
А.С. Виноградова 53
О.А. Виноградова 54
О.И. Виноградова 25
И.С. Водопьянов 54
В.В. Водянова 55
В.С. Вязьмин 34
И.В. Гаганов 34
В.Г. Гагарин 164
А.В. Галатенко 56,57
Д.В. Георгиевский 58
П.Ю. Георгиевский 58,59
К.В. Герасимов 60
А.П. Глинов 61,62
А.М. Головин 62
А.П. Головин 61,62
М.Н. Голосная 63
А.П. Голуб 64
Ю.Ф. Голубев 64
И.В. Голубкина 19
А.Н. Голубятников 65,66,67
В.И. Горбачев 67,68,69
А.Н. Гордеев 69
Н.В. Горохова 70
В.Д. Горячев 71
И.Г. Горячева 72
К.С. Гочелашвили 41
И.С. Григорьев 72,73
Ю.И. Гринь 74
В.Г. Громов 131
С.В. Гувернюк 22,164
К.П. Гурьев 74
С.А. Давыдов 75
И.И. Даржания 54
М.В. Джалалова 75
М.Д. Дзабраев 76
Р.А. Доронин 77
М.З. Досаев 78
Ю.А. Дроздова 198
Я.А. Дынников 22
Г.Я. Дынникова 22
П.А. Дьяков 78
Л.А. Егорова 79
И.К. Ермолаев 32
В.А. Ерошин 80
А.Т. Жакыпов 80
Д.Ю. Жиленко 81,82

А.В. Жуков 82
А.И. Жуков 192
С.А. Жуков 83
Т.А. Журавская 135
И.Е. Забелинский 41
Э.Б. Завойчинская 83
Ю.С. Зайко 84,85,173
Д.В. Залялутдинов 86
М.П. Заплетин 29,43,55,72, 77,80,86,87, 88,89,90
А.В. Зароднюк 91
Н.А. Зверев 92
А.В. Звягин 74,92
А.Г. Здитовец 93,109,142,189
Ю.П. Зезин 31,94,95,96
А.В. Земсков 75,92
А.А. Зензинов 96
К.М. Зингерман 48
А.А. Зобова 60,97,98
О.Э. Зубелевич 98
М.А. Зубин 99
А.Ф. Зубков 100
В.В. Зуев 33
О.О. Иванов 66,100
С.И. Иванов 101
О.А. Иванова 38
Р.М. Изимов 94
А.В. Инюхин 31,102,151
М.Ш. Исраилов 102
А.А. Иткес 103
М.О. Ицкович 104
Л.А. Кабанова 68
И.Б. Казаков 57
В.И. Каленова 151
А.Г. Калугин 104,163
А.В. Карапетян 38,54
В.П. Карликов 105,106
А.Э. Карпов 106
Д.М. Карфидов 41
П.А. Кириллова 86
М.Н. Кирсанов 107
А.Б. Киселев 107,108
Н.А. Киселев 93,109
Ф.Б. Киселев 110
Л.А. Климина 110
В.К. Ковальков 111,188
А.С. Козицын 112
И.В. Козлов 113
И.И. Козлов 114
М.В. Козлов 114
П.В. Козлов 61
Е.В. Колдоба 83,115
А.Ф. Колесников 69
Е.А. Коровайцева 116,117
В.М. Коровин 117
А.А. Коротеев 118
А.А. Корсаков 68
А.А. Коршунов 118
С.А. Косинов 120
Л.А. Костырева 31,151
В.В. Косьянчук 121
В.Д. Котелкин 121
К.В. Краснобаев 122
Б.И. Краснопольский 122
О.Э. Кривоносова 81,82
М.А. Кривчиков 123
А.А. Крупнов 124,166
П.А. Кручинин 124
Е.И. Кугушев 125
Ел.Л. Кузнецова 126
Н.Е. Кузьменко 63,160
А.С. Кулешов 104
А.Г. Куликовский 127
Т.А. Латышева 128
Д.А. Лебедев 129
Н.А. Лебедева 130
В.Ю. Левашов 171
В.А. Левин 58,131,132,133, 134,135
В.Ан. Левин 34,48,49,50,51
М.А. Левин 125
Н.Е. Леонтьев 31,136
А.Р. Лепешкин 137
А.В. Лескин 87,88,89
С.А. Логвенков 138
А.М. Локощенко 139,140
Н.А. Локтева 101,141
В.В. Лохин 79
А.А. Лужин 141
И.С. Лукьянчиков 49
В.Г. Лущик 142
А.Н. Любичева 143
Д.Б. Любошиц 67
Г.Ф. Макаренко 41
М.С. Макарова 93,142
А.Н. Максимов 59
Ф.А. Максимов 99
А.А. Малашин 78
И.С. Мануйлович 131,135,144
В.В. Марков 131,135
Е.Д. Мартынова 144,145
С.А. Маслов 146
А.А. Мастерова 147

Е.В. Мелкумова 64
О.Э. Мельник 25
Т.М. Мельник 68
Д.И. Меркулов 147
М.А. Минченков 55
А.Ю. Митин 126
Е.В. Михальченко 120,148
Е.И. Могилевский 149
Г.Н. Моисеев 97
И.Н. Моисеева 138,149
И.Н. Молодцов 28
А.А. Монахов 121,150
В.М. Морозов 28,151
П.А. Моссаковский 31,143,151
А.В. Муравлев 106,145,147,152
А.В. Мясников 49,50
В.В. Назаров 137,153
Е.Ю. Назарова 69
В.А. Налетова 53,147
В.Л. Натяганов 153,154
В.А. Нерченко 120,155
А.Т. Нечаев 105,106
Т.В. Низкая 25
М.У. Никабадзе 156,157
В.Ф. Никитин 29,113,120,155,158
Н.В. Никитин 159,160,165
Н.А. Никитина 160
С.В. Новотный 192
Н.В. Овчинникова 27,161
А.С. Оконечников 162
А.Н. Осипцов 20,86,118,130
Н.А. Остапенко 99
С.А. Очеретяный 114
Н.В. Павленко 164
Д.В. Павлов 163
О.А. Панкратова 162
И.Л. Панкратьева 163
П.П. Пастушков 164
Д.А. Пелевина 147
Д.А. Пестов 108
К.А. Петровский 51
Д.Е. Пивоваров 165
В.О. Пиманов 165
Д.А. Пичугина 63,160
М.Ю. Погосбекян 166,167
Е.Б. Подкользина 98
В.А. Полянский 163
Н.В. Попеленская 160
О.В. Попов 87,88,89
П.О. Попов 89
Т.В. Попова 125
С.С. Попович 52
Е.С. Попушина 118
А.Б. Порошина 168
О.Г. Привалова 168
В.В. Прокофьев 114,169
А.И. Проскуряков 73
В.А. Прошкин 169
Р.Д. Пряжевский 170
Ю.Ю. Пузина 171
В.И. Путляев 188
С.Г. Пшеничнов 172
А.И. Решмин 85,142,173,174
В.А. Роганов 175
А.Ю. Романова 115
Е.И. Рощин 136
Б.П. Рыбакин 71,148
М.Ю. Рязанцева 176
Д.И. Сабитов 49
Т.В. Сальникова 177
А.С. Самохин 72,177,178
М.А. Самохина 72,178
В.А. Самсонов 47,80
А.Н. Сахаров 179,180,192
В.И. Сахаров 69
А.М. Сбойчаков 49,50
Е.И. Свешникова 127
Ю.Д. Селюцкий 64
А.К. Сенаторов 41
Ф.В. Сергеев 110
К.Ф. Сергейчев 41
А.Л. Сергиевская 167
А.О. Сердюк 126
Д.О. Сердюк 102
И.В. Сильниченко 26
М.М. Симоненко 100
А.Н. Синодов 141
А.А. Синявин 54
Г.М. Сисоев 180
А.Н. Скибицкий 153
Ю.Д. Скобенникова 154
Е.И. Скрылева 113
Г.Д. Смехов 131,132,133,134,167
Н.Н. Смирнов 71,78,158
М.Н. Смирнова 181
А.В. Соколов 111
С.И. Соколов 95
Л.И. Стамов 71,120,148,155
В.С. Станченко 115
А.Г. Степанов 75
И.В. Степанов 154
М.А. Степина 152
М.М. Стронгин 52,93,109
А.Д. Сударикова 84,85,173,174

О.Г. Сутырин 181
Л.Д. Сухановская 32
Р.Р. Тагирова 122
А.К. Такмазьян 169
Д.В. Тарлаковский 102,116,117,185
С.Х. Тепловодский 85,173,174
В.В. Терауд 182
Е.В. Тимохин 183
Г.А. Тирский 39,184
П.В. Тишин 96
С.Л. Толоконников 105,106,184
В.В. Трифонов 173,174
Тунг Нгуен Тхань 185
З.Г. Тунгускова 185
Ю.В. Туник 186
В.А. Турков 53,147
Тхай Чан Ле 117
В.В. Тюренкова 108,120,181
И.В. Тюрин 72
А.Н. Тятюшкин 186
А.Р. Улуханян 156,157
И.О. Фасхеев 38
Г.В. Федотенков 24,47,126,162,170
Е.В. Филатов 169,187
Ю.Г. Филиппов 120
Я.Ю. Филиппов 111,188
А.С. Финошкина 185
В.П. Фокеев 189
Л.В. Фомин 140
А.М. Формальский 41
Э.Т. Хабибулин 179
Д.Е. Хазов 189
А.Д. Хамзаев 190
Г.М. Хамматова 89
А.В. Хапкин 90
А.Н. Хмелевский 131,132,133,134
А.В. Хохлов 191
Ю.Д. Цветкова 192
О.Ю. Черкасов 91
П.В. Чистяков 31,179,180,192
А.Ю. Чулюнин 193
К.В. Шалеев 193
Е.С. Шалимова 110
М.В. Шамолин 194
Г.З. Шарафутдинов 195
О.П. Шаталов 41
Д.А. Шачнев 195
В.Я. Шкадов 22,30
А. Шеленков 180
С.В. Шешенин 114,196
А.С. Шишаева 197
С.А. Шопин 153
А.А. Штейн 138,149
А.С. Шундеев 198
В.А. Щербаков 116
М.Э. Эглит 198,199
А.А. Юдаков 34
Е.Н. Юдина 138
А.Ю. Якимов 187
М.Я. Яковлев 48,49
А.Е. Якубенко 198,199
Т.А. Якубенко 199
А.Н. Якунчиков 121,128,200
Я.Д. Янков 200

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

СЕКЦИЯ МЕХАНИКИ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МГУ имени М.В. Ломоносова

Апрель 2017 г.

Компьютерная верстка Т.А. Якубенко

Подписано в печать .20.09.2017 г. Формат 60x90 1/16
Бумага офсетная № 1 Усл.п.л. 12,8 Тираж 50 экз.

Издательство Московского университета

119191, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1 стр. 15

(ул. Академика Хохлова, д. 11)

Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ
119192, Москва, Мичуринский пр., д. 1