Российская академия наук
Национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела
Институт механики сплошных сред УрО РАН
Научно-образовательный центр «Неравновесные переходы в сплошных средах»

ЗИМНЯЯ ШКОЛА
по механике сплошных сред

(т р и н а д ц а т а я)

Школа молодых ученых
по механике сплошных сред

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Пермь, 2003

УДК [536 + 539.3 + 532.5](063)
Зимняя школа по механике сплошных сред (тринадцатая)
Школа молодых ученых по механике сплошных сред
Тезисы докладов. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
ISBN 5-7691-1327-8

Сборник включает тезисы докладов 13 Зимней школы по механике сплошных сред и проходившей в ее рамках Школы молодых ученых, организованной Научно-образовательным центром “Неравновесные переходы в сплошных средах”.

Сборник отражает тематику школ и содержит результаты исследований по следующим современным проблемам механики сплошных сред: термодинамика сплошных сред; микро- и мезомеханика; пластичность и разрушение; конечные деформации; композиционные и полимерные материалы; конвекция и конвективная неустойчивость; турбулентность; вибрационная гидродинамика и гидродинамика невесомости; магнитная гидродинамика; гидродинамика магнитных жидкостей и мягких магнитных сред; гидродинамика неньютоновских жидкостей; вычислительные технологии в механике сплошных сред.

Школа получила поддержку Российского фонда фундаментальных исследований и Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР).

Редакционная коллегия:

Матвеенко В.П. (гл. редактор), Давыдова М.М., Козлов В.Г., Костарев К.Г., Любимова Т.П., Морозов К.И., Наймарк О.Б., Пшеничников А.Ф., Роговой А.А., Свистков А.Л., Скульский О.И., Славнов Е.В., Фрик П.Г., Цаплина Г.С., Шардаков И.Н., Юрлова Н.А.

З $\frac{101(02)}{8П6(03)1998}$ БО

ISBN 5-7691-1327-8

© ИММС УрО РАН, 2003

©УрО РАН, 2003

Оглавление

Об одной форме уравнений тепломассопереноса и движения жидкости
Р.Ш. Абиев (Санкт-Петербург) 25

Исследование кручения вязкоупругого цилиндра при конечных деформациях и сложном нагружении
А.А. Адамов, М.Н. Галкина (Пермь).....26

Влияние времени на процессы пластического деформирования сталей при комнатной температуре
Н.С. Адигамов (Бишкек).....27

Релаксация внутренних напряжений в наполненых эпоксидных смолах
А.С. Ажеганов, Д.А. Горинов, К.А. Сеник, Н.К. Шестакова (Пермь).....28

Несимметричное взаимодействие вихрей в турбулентном течении
И.Ю. Азизова, А.Ж. Турмухамбетов (Караганда).....29

Численное моделирование турбулентного горения в топочных камерах, оборудованных системами плазменного воспламенения
Ж.Ж. Аканова, Е.И. Лаврищева (Алма-Ата, Казахстан).....30

Численное исследование переноса тяжёлой примеси с облаком горячего газа в атмосфере
А.В. Аксаков (Ижевск) 31

Метод дискретных особенностей в задачах теории фильтрации
А.А. Аксюхин (Орёл).....32

Математическая модель адаптационных процессов в костных тканях нижней конечности человека
Ю.В. Акулич, Р.М. Подгаец, А.В. Сотин (Пермь).....33

Исследование напряженно-деформированного состояния кирпичной кладки стен в стадии эксплуатации
А.Н. Акулова, Г.Г. Кашеварова, Г.Г. Новопашина (Пермь).....34

Колебания стесненной капли под воздействием касательных вибраций твердых торцов
А.А. Алабужев, Д.В. Любимов (Пермь).....35

Характер разрушения при ветвлении трещины в аморфных полимерах
А.А.Алексеев, А.И. Левин, А.С. Сыромятникова (Якутск) 36

Использование метакаталогов для создания справочной системы научного института
А.Н. Алексеев, А.Г. Масич, Г.Ф. Масич, А.В. Созыкин (Пермь) 37

Об устойчивости адвективного течения во вращающемся горизонтальном слое жидкости при малом значении числа Прандтля
Е.А. Алексеева, К.Г. Шварц (Пермь).....38

Анализ напряженно – деформированного состояния при осаживании трубной тонкостенной заготовки
О.А. Алексеенко (Самара).....39

Расчет эффекта Ранка-Хилша
О.Н. Аликина, Е.Л. Тарунин (Пермь).....40

Несжимаемые среды – математические модели и проблемы численного решения
П.А. Ананьев, П.К. Волков, А.В. Переверзев (Калуга) 41

Ионно-лучевая обработка ПЭ волокон и механические характеристики полимерных композитов на их основе
А.Н. Аношкин (Пермь), Н.В. Гаврилов (Екатеринбург), А.Ю. Гордеева, В.А. Огородников, Д.Э. Якушева, Р.М. Якушев (Пермь) 42

Исследование напряженно-деформированного состояния и конструктивное совершенствование композитных электроизолирующих муфт магистральных газопроводов
А.Н. Аношкин, Г.Я. Захаров, В.И. Ломаев, К.А. Покатаев, А.К. Сироткин (Пермь).....43

Исследование механических свойств полиэтилена в условиях низких температур
А.Н. Аношкин, А.Ф. Ларионов, А.Б. Поспелов, Р.М. Якушев (Пермь) 44

Локализованные конвективные структуры в вязкой жидкости
С.Н. Аристов, Д.В. Князев (Пермь).....45

Новая формулировка уравнений Навье-Стокса для несжимаемых жидкостей в переменных «функция тока – силовое поле», ориентированная на задачи течения со смешанными граничными условиями
С.Н. Аристов, О.И. Скульский (Пермь).....46

О развитии трещины при водородном охрупчивании
Е.А. Архангельская, В.В. Лепов (Якутск) 47

Исследование процессов сложного нагружения методами прямого моделирования поведения поликристалла на мезоуровне
В.Н. Ашихмин (Пермь) 48

Сравнительный анализ композиционной и цельнометаллической пильных шин
В.Д. Ашманов, В.А. Ощепков, Л.Н. Ясницкий (Пермь).....49

Разработка программного обеспечения для численного моделирования процессов деформирования и разрушения твердых тел
Н.А. Бабайлов, В.Л. Колмогоров, А.Ю. Плотников, Л.Ф. Спевак, В.Б. Трухин (Екатеринбург) 50

Оценка усталости порошковых структурно - неоднородных материалов при многоосном циклическом деформировании
А.В. Бабушкин, А.А. Чекалкин (Пермь).....51

Моделирование упруго-пластической деформации на мезоуровне с учетом независимых поворотов
Р.А. Бакеев, П.В. Макаров, И.Ю. Смолин (Томск) 52

Моделирование упруго-пластического поведения трехмерной структуры в условиях динамического нагружения
Р.Р. Балохонов, П.В. Макаров , В.А. Романова (Томск), Е. Соппа, З. Шмаудер (Штуттгарт) 53

Моделирование деформации и разрушения стальных образцов с FeB покрытиями
Р.Р. Балохонов, П.В. Макаров, С.В. Панин, В.А. Романова (Томск), З. Шмаудер (Штуттгарт) 54

Динамическое поведение меди при высокоскоростной деформации на стержне Гопкинсона
В.А. Баранников, Е.А. Николаева (Пермь).....55

Экспериментальное и теоретическое изучение релаксационных механизмов в жидкостях при ударно – волновом нагружении
В.А. Баранников, Е.В. Михайлов, Д.О. Наймарк (Пермь) 56

Картины локализации макродеформации в монокристаллах чистых металлов
С.А. Баранникова, К.В. Гончиков, В.И. Данилов (Томск).....57

Исследования «сплошных течений» нанодисперсных порошков
С.П. Бардаханов, В.В. Ларичкин (Новосибирск).....58

Волочение прутка в режиме высокоскоростного гидродинамического трения
М.Е. Басин, М.Г. Бояршинов, Г.Л. Колмогоров (Пермь).....59

Наномеханика усиления: основные принципы
Ю.П. Басс, Ю.А. Гамлицкий (Москва).....60

Применение обобщенных реологических моделей в задачах релаксации остаточных напряжений в поверхностно - упрочненном слое элементов конструкций
Е.В. Башкинова, В.П. Радченко, М.Н. Саушкин (Самара).....61

Итерационные методы определения напряженного состояния при усадке сферических включений в шаровых областях
Вяч.В. Башуров, В.В. Стружанов (Екатеринбург) 62

Учет собственных частот колебаний при конструировании токарных резцов
В.Н. Бедрицкий (Тула) 63

Численное моделирование диффузии в нанодисперсных системах
А.А. Белкин (Новосибирск).....64

Остаточные напряжения и деформации в прутковых металлоизделиях
Н.Г. Белоусова, Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова (Пермь).....65

О возможности применения дейтерида бериллия в качестве материала оболочки лазерных рентгеновских мишеней
С.А. Бельков, Г.В. Долголева, Г.Г. Кочемасов, Е.И. Митрофанов (Саров).....66

Топологические солитоны в слое жидкого кристалла конечной толщины
А. Беляев, Л.Т. Ижбердина, А.Н. Чувыров (Уфа).....67

Особенности расчета течений жидкости со свободной поверхностью в переменных “функция тока – вихрь”
И.К. Березин (Пермь) 68

Каландрование полимерных растворов как задача механики насыщенных пористых сред
Д.А. Березинский, А.В. Костерин (Казань) 69

Моделирование пластических микродеформаций в поликристалле
С.А. Берестова (Екатеринбург).....70

Визуализация динамики микромеханических гироскопов
Е.Е. Бессчастнова, И.А. Комарова, В.М. Мусалимов (С. Петербург) 71

Термокапиллярная неустойчивость в многослойных системах и волны
Р.В. Бирих (Пермь) 72

Неустойчивость равновесия неизотермической бинарной смеси в двухслойной системе с деформируемой границей при наличии поперечных вибраций
Р.В. Бирих, Р.Н. Рудаков (Пермь) *73*

Влияние термокапиллярного эффекта Марангони на тепловое распределение в модельной среде в космических условиях
Н.Н. Бобков (Н.Новгород), Ю.П. Гупало (Москва), О.Р. Козырев, С.В. Оладышкин (Н.Новгород) *74*

Профилирование композиционных маховиков
А.М. Болотов, Т.С. Кочеткова, Т.Н. Лядова (Пермь) *75*

Влияние температуры на предельное состояние образцов из конструкционных сталей
А.М. Большаков, А.Р. Иванов (Якутск) *76*

Воздействие вращающегося магнитного поля на переход к осциллирующему режиму термокапиллярной конвекции и рост кристаллов методом плавающей зоны в условиях невесомости
Н.В. Бондарева, А.И. Феонычев (Москва) *77*

Численный анализ релей-тейлоровской неустойчивости на фронте волны нелинейной электронной теплопроводности
С.В. Бондаренко, Г.Г. Кочемасов (Саров) *78*

Алгоритмы распараллеливания одномерной схемы Годунова для кластерных вычислительных систем
О.С. Борщук, К.И. Михайленко (Уфа) *79*

Численное моделирование на многопроцессорной ЭВМ газового потока вблизи высокоскоростного импульсного источника
М.Г. Бояршинов, А.В. Харченко (Пермь) *80*

Высокоскоростная деформация сплавов АМГ6 и АК-6
А.М. Брагов, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев (Н. Новгород) *81*

Конвективный теплообмен при погружении литосферы в мантию Земли
А.Н. Буров, С.В. Соловьев (Хабаровск) *82*

Конвективный теплообмен электропроводной жидкости в сферическом слое с учетом Джоулевой диссипации
А.Н. Буров, С.В. Соловьев (Хабаровск) *83*

Эффект адсорбции в ячейке ферронематика
С.В. Бурылов (Днепропетровск, Украина), В.И. Задорожный, И.П. Пинкевич, В.Ю. Решетняк (Киев, Украина) *84*

Условия повышения эффективности генерации высокоамплитудных кавитационных автоколебаний давления жидкости
С.В. Бурылов, Ю.А. Жулай (Днепропетровск, Украина) *85*

Усилия, действующие на блок высококоэрцитивных постоянных магнитов
С.В. Бурылов, В.Э. Воскобойник, В.Ф. Новиков (Днепропетровск, Украина) *86*

Растяжение полосы с V-образными вырезами в рамках теории плоской деформации
А.А. Буханько (Комсомольск-на-Амуре) *87*

Бифуркационные диаграммы, показатели Ляпунова и энтропия Колмогорова в анализе изотропного турбулентного течения
Г.П. Быстрай, С.И. Студенок (Екатеринбург) *88*

Форма струи загрязнителя от поверхностного источника в зоне аэрации
М.А. Вагин (Казань) *89*

Параллелизация операций решения систем алгебраических уравнений методом многомерной скалярной прогонки
Д.А. Вайнер, В.Д. Корнеев, Н.М. Покрышкина, А.Ю. Слюняев, А.В. Танасейчук, А.Г. Тарнавский , Г.А. Тарнавский (Новосибирск) *90*

Модификация разрезного стержня Гопкинсона для испытания поведения материалов при комбинированном нагружении
А.В. Ванин (Н. Новгород) *91*

Неустойчивость по Ляпунову в аэроупругости
В.И. Ванько (Москва) *92*

Нахождение остаточных напряжений и деформаций при формировании трехслойной полусферической оболочки из стеклометаллокомпозита
О.Н. Васильева , В.В. Пикуль (Владивосток) *93*

Системный подход к анализу динамики подъемно-мачтовых устройств
А.А. Васин (Тула) *94*

Определение спектра свободных колебаний упругих неоднородных прямых стержней методом начальных параметров
А.А. Васин, М.В. Васина (Тула) *95*

О постановке краевой задачи механики сверхпластичности
Р.А. Васин (Москва) *96*

Суперэлементное моделирование движений в гимнастике
С.А. Васин, Е.Д. Грязева, М.В. Грязев (Тула) *97*

Алгоритм численного исследования динамического поведения стержней в насосных системах при учете сжимаемости жидкости и податливости подвески насоса
И.Н. Вассерман (Пермь) *98*

Использование структурно-феноменологической модели ползучести для прогнозирования процессов ползучести и релаксации различных материалов
И.И. Ведерникова (Саров), А.В. Коновалов (Екатеринбург), А.И. Коршунов, Л.В. Поляков (Саров) *99*

Распространение плоских волн в упругом полупространстве при произвольно заданных начальных условиях и граничных условиях второго рода
Н.А. Веклич (Москва) *100*

Количественные характеристики инвариантных свойств нерегулярных гидродинамических структур на основе вейвлет-анализа
И.И. Вертгейм, В.Г. Захаров (Пермь) *101*

Влияние предварительного циклического нагружения на закритическое деформирование дисперсноупрочненных металлокомпозитов на основе меди
В.Э. Вильдеман , А.Н. Горбунов (Пермь) *102*

Закономерности процессов накопления повреждений и условия перехода к локализованному разрушению зернистых композитов
В.Э. Вильдеман, А.В. Зайцев (Пермь).....103

Моделирование разрушения металлов в процессе вырубки
Ю.В. Виноградов (Тула).....104

Исследование пластичности материала при ступенчатом изменении напряженного состояния
Д.И. Вичужанин, С.В. Смирнов (Екатеринбург).....105

Оценка напряжённо-деформированного состояния изделий при наличии подвижной зоны контакта
А.А. Вишняков, Н.М. Кочнева, С.В. Ямалитдинова (Пермь).....106

Подмодели специально сжимаемой жидкости на двумерных подалгебрах
В.Г. Волков (Уфа).....107

Исследование влияния накопленной деформации на качество неоднородной конструкции
Д.А. Волков, И.О. Жигулев, В.Г. Шибаков (Набережные Челны).....108

Нелинейная динамика контактной границы сплошных сред с различной плотностью
Н.Б. Волков (Екатеринбург), А.Е. Майер, К.А. Талала, А.П. Яловец (Челябинск).....109

Эффекты взаимодействия естественной и вынужденной конвекции
П.К. Волков, А.В. Переверзев (Калуга).....110

Экспериментальное исследование диффузионной кинетики поглощения растворителей сшитыми эластомерами в условиях одноосного растяжения
Е.Р. Волкова, Е.Я. Денисюк, Р.М. Якушев (Пермь).....111

Математическое моделирование эволюции дислокационной структуры и релаксации напряжений при фазовом $\alpha - \beta$ переходе в системе Pd – H
А.Б. Волынцев, А.Н. Шилов (Пермь).....112

Конвективные течения газа, вызванные периодическим изменением плотности
Е.В. Вьюжанина, С.В. Русаков, Е.Н. Федоровцева (Пермь).....113

Особенности временной эволюции хемо-гравитационной конвекции на сферической поверхности
А.В. Вязьмин, Д.А. Казенин, В.А. Каминский, С.П. Карлов (Москва).....114

Некоторые аспекты построения сеток конечных элементов с применением метода Делоне
С.Н. Вяткин (Пермь).....115

Исследование влияния степени обжатия резины на изменение свойств при растяжении
Г.Я. Гавриленко, В.Г. Золотухин, В.Н. Ковров, В.В. Мошев (Пермь).....116

Динамика накопления выбросов отрицательной плавучести с учетом массообменных процессов с окружающей средой
Г.Р. Галиаскарова (Стерлитамак).....117

Эффективная вязкость суспензий в высокочастотном электромагнитном поле
А.Д. Галимбеков (Уфа).....118

Эволюция волн давления в жидкости при наличии в ней пузырьковой зоны ограниченных размеров
М.Н. Галимзянов (Уфа).....119

Основной резонанс в полуоткрытой трубе при турбулентном режиме колебаний газа
Р.Г. Галиуллин, Л.А. Ткаченко (Казань) *120*

Кинетико-вероятностный подход к прогнозированию прочности зернистых эластомерных композитов
О.К. Гаришин, Л.А. Комар (Пермь) *121*

Температурные эффекты, возникающие при ударном взаимодействии пластин из функционально-градиентных материалов
А.В. Герасимов, Д.М. Шалковский (Томск) *122*

Механизмы пластической деформации интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$, обладающих аномальной температурной зависимостью механических свойств
М.В. Геттингер, Ю.В. Соловьева, В.А. Старенченко (Томск) *123*

Аналитическое решение задач термоупругости методом фиктивных канонических областей
С.Л. Гладкий (Пермь) *124*

Расчет высокоскоростного взаимодействия стального цилиндра с преградой при ударе по нормали
В.А. Глазырин, В.А. Горельский, А.А. Рогова (Томск) *125*

Динамика трехмерного процесса несимметричного взаимодействия деформируемых тел с жёсткой стенкой
В.А. Глазырин, В.А. Горельский, Е.А. Минакова (Томск) *126*

Кинетическая трактовка структурно-временного критерия разрушения
П.А. Глебовский, Ю.В. Петров (С. Петербург) *127*

Математическая модель процесса ультразвуковой дефектоскопии пространственных трещин
Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, А.В. Ехлаков (Краснодар) *128*

Инженерный расчет вихревых аппаратов
И.В. Гневанов, О.В. Русакова (Пермь) *129*

Распространение волны уплотнения в перекрывающем глинистом слое при отборе жидкости из пласта
Б.Э. Гоголашвили (Казань) *130*

Постановка задачи и разработка алгоритма исследования больших деформаций упругих тел
А.И. Голованов, А.С. Сенникова, Л.У. Султанов (Казань) *131*

Исследование динамического поведения оболочек МКЭ
А.И. Голованов, А.Ф. Шигабутдинов (Казань) *132*

Расчет многослойных оболочек МКЭ при упруго-пластическом деформировании в геометрически нелинейной постановке
А.И. Голованов, О.Н. Тюленева, С.А. Якушин (Казань) *133*

Континуальное описание механического поведения зернистых композитов с использованием электронных таблиц
Л.А. Голотина, Л.Л. Кожевникова (Пермь), Л.В. Милякова (С. Петербург) *134*

Подобие и моделирование процессов разрушения
Р.В. Гольдштейн (Москва) *135*

Численное исследование плавления над локальным источником тепла с учетом естественной конвекции
А.В. Гореликов, Е.Ю. Городенцев (Сургут) 136

Механика контактного взаимодействия и разрушения тел с покрытиями
И.Г. Горячева, Е.В. Торская (Москва) 137

Нелинейная эволюция вихревой структуры в возбужденном молекулярном газе
Ю.Н. Григорьев, И.В. Ершов (Новосибирск) 138

Физико-химическая гидродинамика и оптимизация плазмохимических реакторов травления
А.Г. Горобчук, Ю.Н. Григорьев (Новосибирск) 139

Возникновение и исчезновение вихрей в ламинарном течении: ряд вихрей Калашникова-Циклаури и эффект Noto
А.В. Гудзовский (Москва) 140

Нелинейные краевые задачи для полиэтиленовых труб со стальной арматурой
М.А. Гуляева, В.Ю. Зуйко, С.Г. Иванов (Пермь) 141

Критерии устойчивости вязкоупругих пластин
А.В. Гурьянов, В.И. Желтков (Тула) 142

Граничные задачи динамической теории упругости для изотропного пространства с дефектом в плоскости
А.А. Гусенкова (Казань) 143

Математическое моделирование дилатансионных эффектов при динамических нагружениях
А.В. Давыдов, В. В. Зуев (Москва) 144

Применение концепции фракталов к моделированию процесса накопления повреждений и анализу поверхностей разрушения
М.М. Давыдова (Пермь) 145

Исследование влияния различных механизмов и процессов пластической деформации скольжения на деформационное упрочнение гетерофазных материалов с недеформируемыми частицами
О.И. Данейко, Т.А. Ковалевская, С.Н. Колупаева, Е.В. Комарь (Томск) 146

Новый метод решения статической задачи несимметричной теории упругости
В.М. Деев (Пермь) 147

Приближение временных корреляционных функций при компьютерном моделировании процессов магнитной динамики твердых растворов суперпарамагнитных наночастиц
А.Г. Деменев (Пермь) 148

Распределение примеси в расплавах полупроводников при воздействии вращающегося магнитного поля в процессах выращивания кристаллов по методу плавающей зоны
В.А. Демин, Д.В. Любимов, Т.П. Любимова (Пермь) 149

Использование метода прямого численного моделирования (DSMC) в задачах газодинамики
К.С. Денисов, В.И. Токманцев (Екатеринбург) 150

Лабораторный динамо эксперимент – Пермский проект
С.А. Денисов, В.И. Носков, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик, С.Ю. Хрипченко (Пермь) 151

Фотоупругий эффект в холестерических жидких кристаллах
О.А. Денисова, А.Н. Чувыров (Уфа) *152*

Резонансное поглощение поперечных акустических волн в холестерических жидких кристаллах
О.А. Денисова, А.Н. Чувыров (Уфа) *153*

Механика полимерных гелей
Е.Я. Денисюк (Пермь) *154*

Неравновесные процессы деформирования и набухания полимерных сеток в низкомолекулярных растворителях
Е.Я. Денисюк (Пермь) *155*

О механохимической нестойкости жидкой воды
И.Н. Диденкулов, Г.А. Домрачев, Д.А. Селивановский , (Н.Новгород), П.А. Стунжас (Москва), В.В. Чернов (Н.Новгород) *156*

Об эффективности параллельных итерационных методов для линейных алгебраических систем
Е.В. Довольнов, С.В. Шешенин (Москва) *157*

Устойчивость термокапиллярной конвекции при колебании свободной поверхности под действием вибрации и рост кристаллов методом плавающей зоны в этих условиях
Г.А. Долгих, А.И. Феонычев (Москва) *158*

Использование пакета ADAMS в динамических расчетах механических систем
И.В. Домбровский, Н.А. Шевелев (Пермь) *159*

Связанная вязко-упругая модель пространственного деформирования позвоночника человека и его сегментов при сочетанных нагрузках
А.Н. Дондоков, А.А. Оксогоев (Улан-Удэ) *160*

Влияние запаздывания в системе на динамику фазовых переходов в конденсированных средах вблизи положения равновесия
И.Н. Доценко (Уфа) *161*

Расчет течений двух жидкостей между цилиндрическими поверхностями
И.С. Дружинина, А.А. Лежнева, И.И. Першакова, Н.В. Шакиров (Пермь) *162*

Захваченные волны над наклонной прибрежной отмелью при наличии вращения
В.А. Дубинина, А.А. Куркин, О.Е. Полухина (Н. Новгород) *163*

Оптимальное управление в некоторых задачах гидродинамики
И.В. Дубовиченко, А.А. Олейник, Ел.В. Шкляева (Пермь) *164*

Растворение цилиндрических капель бинарной смеси
И.В. Дубровских, К.Г. Костарев (Пермь) *165*

К обоснованию построения феноменологической стохастической модели реологического микродеформирования и разрушения материалов
С.А. Дудкин, В.П. Радченко (Самара) *166*

Исследование структурных геометрических и физических полей в механике упругопластических композитов
Н.В. Евлампиева, А.А. Ташкинов (Пермь) *167*

Механизм усиления каучуков наполнителями, как трибоупругий феномен
С.Е. Евлампиева, В.В. Мошев (Пермь).....168

Моделирование упругопластической деформации градиентных материалов и материалов с покрытиями
Е.П. Евтушенко, П.В. Макаров (Томск).....169

К построению новых алгоритмов минимизации функции невязки по склону
А.В. Елесин (Казань).....170

Исследование эрозионного следа на поверхности полимеров
В.В. Елтышев, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин (Пермь).....171

Влияние фрактальных агрегатов на магнитную проницаемость феррожидкости
Е.А. Елфимова (Екатеринбург).....172

Основные положения прочностной теории напряженного состояния
Ю.А. Ельцов (Ижевск).....173

О конвективной неустойчивости механического равновесия плоского слоя вязкоупругой микрополярной жидкости
В.А. Еремеев, Д.А. Сухов (Ростов-на-Дону).....174

Нелинейная теория упругих оболочек, учитывающая поперечные сдвиги и обжатие
А.В. Ермоленко, Е.И. Михайловский (Сыктывкар).....175

Предельные соотношения для функции, представленной формулой Кирхгоффа, и ее частных производных и их приложения
М.Т. Жапаров, Ш.Д. Шамгунов (Бишкек).....176

Усреднение свойств материалов в механике неоднородных сред
Н.В. Жданов, Н.М. Комарцов (Бишкек).....177

Конечноэлементная реализация модального разложения
В.И. Желтков, Д.А. Кашулин, Д.В. Комолов (Тула).....178

Модернизация процесса получения изделий из полимерных композиционных материалов для литья по выплавляемым моделям
С.Г. Жилин, И.Г. Сапченко (Комсомольск-на-Амуре).....179

Рост дискообразной трещины в сплошном цилиндре неограниченной длины в условиях нестационарного нагрева
В.А. Жорник (Таганрог).....180

Обтекание трехмерного погружного датчика потоком вязкого, теплопроводного газа с крупными примесями
А.А. Завада, А.О. Могильников, Б.Т. Породнов (Екатеринбург).....181

Реализация релаксационных свойств асфальтобетонной смеси при уплотнении
М.А. Завьялов (Омск).....182

Спектральные свойства длинных магнитогидродинамических волн в идеально проводящей вязкой жидкости в вертикально стратифицированном магнитном поле
А.И. Задорожный (Ростов – на - Дону).....183

Компьютерный синтез и исследование случайных полей структуры однонаправленно армированных волокнистых композитов
А.В. Зайцев, А.В. Лукин, Н.В. Трефилов (Пермь).....184

Моделирование исторических цунами, сопровождавших Черноморские землетрясения
А.И. Зайцев, А.С. Козелков, А.А. Куркин, И.Ф. Николкина (Н. Новгород) 185

Неустойчивость сферической формы пузырька при лазерной кавитации
К.Р. Закиров (Уфа) 186

Эволюция альвеновской волны при однородной деформации плазмы вдоль крупномасштабного магнитного поля
С.Н. Замоздра (Челябинск) 187

Генерация продольных вихревых структур в слое смешения сверхзвуковой недорасширенной струи
В.И. Запрягаев, Н.П. Киселёв (Новосибирск) 188

Нелинейная динамика трубопроводов, возбуждение периодических и хаотических колебаний
Д.М. Зарипов, М.А. Ильгамов, Р.Л. Лукманов (Уфа) 189

Оценка полных и частичных равновесий в сплошных средах
М.С. Зароднюк, Б.М. Каганович, С.П. Филиппов (Иркутск) 190

Построение вейвлет-базисов с компактным носителем, адаптированных к дифференциальным операторам
В.Г. Захаров, И.Н. Ипанов (Пермь) 191

Пороговые магнитные поля в неограниченном ферронематике
А.Н. Захлевных (Пермь) 192

Использование численных методов для выделения поверхностей разрывов в задачах динамики деформируемых сред
П.В. Зиновьев (Владивосток) 193

Новый вид кумуляции энергии и импульса метаемых взрывом пластин и оболочек
С.И. Зоненко, Г.Г. Черный (Москва) 194

Фазовые переходы в магнитореологических суспензиях
А.Ю. Зубарев, Л.Ю. Искакова, А.П. Романчук (Екатеринбург) 195

Неравновесные фазовые переходы в жидких кристаллах
А.Ю. Зубарев (Екатеринбург) 196

Цепочечные структуры в феррожидкостях
А.Ю. Зубарев, Л.Ю. Искакова (Екатеринбург) 197

Фрактальная структура коллоидного агрегата
А.Ю. Зубарев, А.О. Иванов (Екатеринбург) 198

Формирование геометрических особенностей на свободной поверхности жидкостей в электрическом поле
Н.М. Зубарев (Екатеринбург) 199

Исследование дислокационной структуры и внутренних напряжений в устойчивых полосах скольжения
И.Ю. Зубко, И.Э. Келлер, П.В. Трусов (Пермь) 200

О растяжении и кручении нелинейно упругого цилиндра с винтовой дислокацией
Л.М. Зубов, А.В. Соколов (Ростов-на-Дону) 201

Предварительно напряжённое включение в растягиваемом и скручиваемом цилиндре
Л.М. Зубов, А.В. Попов (Ростов-на-Дону).....202

Колебательная конвекция Марангони возле пузырька воздуха в жидкости с вертикальной стратификацией ПАВ
А.Л. Зуев, К.Г. Костарев (Пермь) 203

О тепловой конвекции в условиях контролируемых микроускорений
А.В. Зюзгин, Г.Ф. Путин, А.В. Чудинов, Н.Г. Щербакова (Пермь).....204

Экспериментальное исследование границы раздела “сыпучая среда – жидкость” при горизонтальных вибрациях
А.А. Иванова, А.Ф. Кузаев (Пермь) 205

Экспериментальное исследование взаимодействия двух сферических тел в жидкости при вибрациях
А.А. Иванова, А.Ф. Кузаев (Пермь) 206

Исследование поведения границы раздела двух жидкостей при круговых вибрациях в зависимости от высоты полости
А.А. Иванова, С.И. Ташкинов (Пермь).....207

Исследование особенностей процесса деформирования и разрушения элементов конструкций в условиях неоднородно-напряженного состояния по тепловому излучению
А.М. Иванов, Е.С. Лукин (Якутск) 208

Двойное лучепреломление в полидисперсных феррожидкостях, содержащих короткие цепочечные агрегаты
А.О. Иванов, С.С. Канторович (Екатеринбург) 209

«Ферромагнитное» состояние магнитных жидкостей
А.О. Иванов (Екатеринбург).....210

К теории магнитостатических свойств феррожидкостей с высокой интенсивностью диполь-дипольного взаимодействия
А.О. Иванов, О.Б. Кузнецова, Е.Н. Резников (Екатеринбург) 211

Моделирование рассеивания облака продуктов сгорания, образующегося при испытаниях РДТТ на открытом стенде
В.Н. Иванов, В.М. Суслонов, В.А. Шимановский (Пермь) 212

Численное моделирование процесса зарождения тайфунного вихря
М.Ф. Иванов, Е.М. Поварницын (Москва).....213

Влияние структурных особенностей зернистых композитов на характер процессов разрушения
А.В. Ильиных (Пермь).....214

Гидравлическое приближение в теории расслоенных течений
А.М. Ильясов (Уфа) 215

Численное прогнозирование вязкоупругих характеристик однонаправленных волокнистых полимерных композитов
Е.В. Кандакова, О.Ю. Сметанников (Пермь).....216

Расчет магнито-вязкостного эффекта в рамках полидисперсной модели образования цепочечных агрегатов в магнитных жидкостях (мж)
С.С. Канторович (Екатеринбург).....217

2 ½ - мерная методика расчета уравнений Максвелла в МГД приближении на квадратной адаптивной сетке
Н.Г. Карлыханов, А.В. Уракова (Снежинск).....218

Ориентация макроструктуры в процессе гидроэкструзии в твердой фазе
Е.И. Кароид, Е.В. Славнов (Пермь).....219

Поведение тел в ограниченных объемах жидкости в однородном магнитном или электрическом поле
А.С. Квитанцев, В.А. Налетова, В.А. Турков (Москва).....220

Модель образования фрагментов поворота решетки и полос сдвига при холодной деформации металлов
И.Э. Келлер, П.В. Трусов (Пермь).....221

Моделирование динамики застойной зоны при расслоенном течении вязких несмешивающихся жидкостей
В.Н. Киреев (Уфа).....222

О течении жидкости с температурной аномалией вязкости
В.Н. Киреев, С.Ф. Урманчеев (Уфа).....223

Моделирование формирования детонации на многопроцессорной вычислительной системе
И.А. Кириллов (Москва), Ю.А. Кондрашов, Е.В. Осинина, А.В. Панасенко, (Королев).....224

К развитию синергетических представлений в механике динамической сверхпластичности
Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев (Бишкек).....225

Оптимизация динамических свойств тонкостенных электроупругих систем
Е.П. Клигман, В.П. Матвеенко, Н.А. Юрлова (Пермь).....226

Исследование волн цунами, вызванных метеорологическими причинами
Н.М. Клюева, А.А. Куркин (Н.Новгород).....227

Математическая модель процессов тепло – и массопереноса полимера в канале пластицирующего экструдера
Л.А. Ковригин, Н.М. Труфанова, А.Г. Щербинин, В.И. Янков (Пермь).....228

Моделирование температурного поля пластицирующего экструдера
Л.А. Ковригин, А.Е. Терлыч, А.Г. Щербинин (Пермь).....229

Структура холестерического жидкого кристалла в акустическом переходе Фредерикса за порогом эффекта
Е.Н. Кожевников (Самара).....230

Исследование движения изотермической жидкости в полости прямоугольного сечения, совершающей вращательные вибрации
В.Г. Козлов, Н.В. Селин (Пермь).....231

Исследование осредненного движения жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре
В.Г. Козлов, А.В. Чиграков (Пермь).....232

Инициализация счета турбулентного перемешивания на основе уравнения для амплитуды возмущения
В.И. Козлов , И.В. Сапожников (Саров).....233

Выбор предпочтительного решения для задачи об одноосном растяжении цилиндра из жесткопластического материала
О.В. Козлова (Комсомольск-на-Амуре) 234

Электровихревое течение в прямом плоском канале с ферромагнитными сердечниками
И.В. Колесниченко, С.Ю. Хрипченко (Пермь) 235

Влияние пространственной неоднородности нагрева на генерацию крупномасштабного спирального вихря
И.В. Колесниченко, Г.В. Левина, А.Н. Сухановский (Пермь) 236

Теплофизические и механические свойства ДУКМ на основе меди
Г.Л. Колмогоров, А.С. Мокрецов, Т.А. Ульрих (Пермь) 237

Локализация пластического течения в ГПУ - сплавах циркония
С.В. Колосов, Г. Н. Нариманова, Т.М. Полетика (Томск) 238

Разработка пакета программ для описания закономерности пластической деформации в ГЦК материалах
С.Н. Колупаева, М.Е. Семёнов (Томск) 239

Исследование закономерностей пластической деформации скольжения в ГЦК монокристаллах
С.Н. Колупаева, С.И. Пуспешева (Томск) 240

Использование многопроцессорной вычислительной системы МВС - 1000 для решения трехмерных контактных задач упругих слабосжимаемых тел при конечных деформациях
А.С. Кольцов (Пермь) 241

Моделирование вязкоупругих свойств и эффекта размягчения эластомерного материала
Д.В. Комар, Л.А. Комар (Пермь) 242

Напряженно-деформированное состояние цилиндра и трубы при кручении с большими пластическими деформациями
А.В. Коновалов (Екатеринбург) 243

Колебания сферической жидкой капли, окруженной неконцентрическим сферическим слоем другой жидкости
В.В. Коновалов, Т.П. Любимова (Пермь) 244

Предотвращение ползучести льда при бурении глубоких скважин в ледовых отложениях
Н.С. Кононова (Санкт-Петербург) 245

Деформирование и разрушение соляных пород при разработке месторождений
С.А. Константинова, С.А. Чернопазов (Пермь) 246

Метод многомасштабной декомпозиции для вычисления эффективных свойств композитов
С.П. Копысов, Ю.А. Сагдеева (Ижевск) 247

Экспериментально-теоретические исследования особенностей деформационного поведения упругих тел в рамках несимметричной теории упругости
В.В. Корепанов, В.П. Матвеенко, И.Н. Шардаков (Пермь) 248

Экспериментальное исследование влияния седиментации на развитие конвекции реагирующего мономера в центробежном поле
К.Г. Костарев, А.В. Шмыров (Пермь) 249

О спонтанной закрутке в модельных МГД-течениях с замкнутыми линиями тока
М.С. Котельникова (Новосибирск) *250*

Моделирование процесса экструзии профилированных изделий из резины
В.Д. Кошур, С.А. Мартьянов (Красноярск) *251*

О методах идентификации характеристик неоднородных материалов
А.С. Кравчук (Москва) *252*

Движение слоев намагничивающихся жидкостей в неоднородных магнитных полях
С.Д. Краснов, В.А. Налетова, В.А. Турков (Москва) *253*

Эксперименты по кристаллической конверсии графита в алмаз на крупномасштабной баллистической установке ЦНИИМАШ
П.В. Крюков, А.И. Чирков (Москва) *254*

Исследование стохастических колебаний гибких многослойных неспаянных ортотропных пластинок при действии продольных знакопеременных нагрузок
А.В. Крысько, О.А. Овсянникова (Саратов) *255*

Исследования бифуркаций бесконечно длиных пластин и оболочек при действии поперечных и продольных знакопеременных нагрузок
А.В. Крысько, В.О. Назарьянц, Г.Г. Наркайтис (Саратов) *256*

Исследование стохастических колебаний гибких сферических и конических оболочек
В.А. Крысько, И.В. Кравцова, Т.В. Щекатурова (Саратов) *257*

Магнито-гранулометрический анализ концентрированных феррожидкостей
О.Б. Кузнецова (Екатеринбург) О.Б. Кузнецова (Екатеринбург) *258*

Модификация пакета программ SINARA для расчета слабосжимаемых сред
С.Ю. Кузьмин, С.Н. Лебедев, М.С. Ураков (Снежинск) *259*

Тестирование производительности коммуникационной среды MBC-1000
Ю.И. Кузякин (Екатеринбург), Г.Ф. Масич, С.С. Перетятько (Пермь) *260*

Сверхпластическая деформация разносопротивляющихся материалов
В.И. Кунеев (Бишкек) *261*

Численное моделирование трехмерных релятивистских газодинамических течений
Е.П. Курбатов (Челябинск) *262*

Новый взгляд на процесс высокоскоростного упругопластического деформирования реальных тел
В.Т. Курохтин (Москва) *263*

Параметрическая оптимизация композитных оболочек
А.Ш. Кусяков (Пермь) *264*

Численное моделирование и исследование воздействия линейных ускорений на работу кровеносной системы
О.В. Лаврова (Новосибирск) *265*

Фарадеевская неустойчивость на магнитной жидкости с цепочками
А. Ланге, В. Мехоношин (Дрезден) *266*

Влияние стоячей звуковой волны на возникновение конвекции в горизонтальном слое
Н.А. Лапина, Д.В. Любимов, Т.П. Любимова, С.В. Шкляев (Пермь) *267*

Упругие и прочностные свойства матричных композитов
С.Н. Лапшина, Е.А. Митюшов, Е.М. Романовская (Екатеринбург) 268

Некоторые способы расчета статической магнитной восприимчивости ферроколлоидов
Е.В. Лахтина (Пермь) 269

Энергетический критерий хрупкого разрушения для случая комбинированного нагружения
В.В. Лепов, В.Н. Петров, Х.Н. Семенов (Якутск) 270

Новый механизм деформации и переориентации кристаллической решётки путём динамических фазовых превращений в полях напряжений
И.Ю. Литовченко, А.Д. Коротаев, А.Н. Тюменцев (Томск) 271

Моделирование гранулирования сыпучих материалов
Д.В. Лобовиков (Пермь) 272

Акустический метод оценки прочности металлов и сплавов
Д.В. Лобовиков (Пермь) 273

О переходе от обтекания тонкого профиля к течению вокруг плохообтекаемого тела
М.А. Лушников (Москва) 274

Несимметричные конечные интегральные преобразования и их применения к нестационарным задачам вязкоупругости
С.А. Лычев (Самара) 275

Об устойчивости пылевого облака в плоском вертикальном слое
Д.В. Любимов, Т.П. Любимова, А.В. Штраубе (Пермь) 276

О длинноволновой конвекции в двухслойной системе с деформируемой границей раздела
Д.В. Любимов, С.В. Шкляев (Пермь) 277

Численное моделирование процесса выращивания кристаллов полупроводников по методу VGF в присутствии вращающегося магнитного поля
Т.П. Любимова, О.А. Хлыбов (Пермь).....278

Мезомеханика процессов ударно-волнового деформирования и разрушения
П.В. Макаров (Томск).....279

Расчет температурного поля в полупроводниковом стержне с током
О.И. Марков, О.А. Мызникова (Орел).....280

Математическая модель эволюции остаточных напряжений в неоднородно легированном стеклующемся материале
В.П. Матвеенко, А.Н. Труфанов (Пермь).....281

О многомасштабности процесса разрушения
С.В. Мельников, И.А. Пантелеев (Пермь) 282

Численное моделирование крупномасштабной магнитной структуры в сферической капле магнитной жидкости
В.В. Мехоношин (Дрезден), А.Ф. Пшеничников (Пермь).....283

Экспериментальное исследование влияния характеристик газовой фазы на устойчивость и структуры течения в двухслойной системе жидкость-газ
А.И. Мизёв (Пермь).....284

Применение вейвлет-анализа и метода Δ-вариаций для спектрального и корреляционного анализа галактических изображений
И.А. Мизёва, И.А. Патрикеев, П.Г. Фрик (Пермь) 285

Разрушение образца в испытательной машине при циклическом нагружении
В.И. Миронов, А.В. Якушев (Екатеринбург) 286

Экспериментальное изучение образования диссипативных структур и возникновения динамической стохастичности при циклическом нагружении металлов
Е.В. Михайлов, С.В. Уваров (Пермь) 287

Расчет сопротивления решеток затупленных тел при умеренных числах Рейнольдса
И.В. Моренко (Казань) 288

О возникновении дальнего ориентационного порядка в магнитных коллоидах
К.И. Морозов (Пермь) 289

Неосесимметричное динамо в тесных двойных системах
Д. Мосс (Манчестер), Н. Пискунов (Упсала), Д.Д. Соколов (Москва) 290

Многостепенные динамические стенды полунатурного моделирования из композиционных материалов
Р.М. Мулюков (Казань), К.З. Хайрнасов, Р.С. Якушев (Москва) 291

Напряженно-деформированное состояние структурных составляющих при деформации сложнолегированной латуни
М.В. Мясникова, С.В. Смирнов, А.Н. Солошенко, А.В. Тропотов (Екатеринбург) 292

Течение жидкости с пузырьками в канале с тепловыделяющими стенками
С.И. Назарова (Казань) 293

О динамическом скейлинге в ансамблях мезодефектов и некоторых нелинейных проблемах пластичности и разрушения
О.Б. Наймарк (Пермь) 294

Сферическое тело в магнитной жидкости в скрещенных электрическом и магнитном полях
В.А. Налетова, А.Н. Тятюшкин (Москва) 295

Разработка визуализации и управления в конечно-элементном комплексе ACELAN
А.В. Наседкин, А.Л. Петушков, А.Н. Соловьев (Ростов-на-Дону) 296

Обобщение уравнения Плессета для несферических колебаний газового пузырька в жидкости
Э.Ш. Насибуллаева (Уфа) 297

Особенности моделирования процессов распространения выбросов в приземном слое атмосферы с использованием ANSYS/Flotran
Р.И. Натхина (Ростов-на-Дону) 298

Неустойчивость состояний покоя невязкой сжимаемой идеально проводящей среды со свободной поверхностью в магнитном поле
М.-Б.А. Негматов (Новосибирск) 299

Каскадные процессы переноса энергии магнитного поля за счет эффекта Холла
В.А. Некрасов, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик (Пермь) 300

Высокоскоростное движение пластины в рамках самосогласованного нелокально - гидродинамического подхода
И.А. Никулин, Т.А. Хантулева (С.Петербург).....301

Эволюционные определяющие соотношения для вязкоупругого слабосжимаемого твердого тела с дискретным спектром времен релаксации
Р.С. Новокшанов, А.А. Роговой (Пермь) 302

Численное моделирование и исследование воздействия невесомости на работу кровеносной системы
К.Г. Номоконова (Новосибирск) 303

Распространение упругой волны в упругом полупространстве, составленном из двух четвертьпространств с различными упругими свойствами
С.Е. Носов (Москва) 304

Аналитические решения некоторых контактных задач для струн, балок и пластин
Ю.И. Няшин, М.А. Осипенко (Пермь).....305

Оптимальное управление в некоторых задачах фильтрации двухфазной жидкости
А.А. Олейник, Е.В. Шкляева (Пермь) 306

Синергетика пластической деформации
А.И. Олемской (Сумы, Украина) 307

Вероятностные модели прочности и разрушения дискретных систем
Д.А. Онищенко (Москва) 308

Метод фрактальных карт механизма адаптации структуры деформируемых твердых сред к внешним воздействиям в экстремальных технологиях
А.А. Оксогоев (Улан-Удэ).....309

Модели элементарных ячеек для расчета давления при неравновесном объемном энерговыделении в гетерогенном материале с дисперсным наполнителем и пористым связующим
А.В. Острик, Е.А. Ромадинова (Черноголовка) 310

Роль мультипликативного разложения градиента места в механике деформируемого твердого тела
В.А. Пальмов (Санкт - Петербург) 311

Краевые задачи пьезомеханики структурно - неоднородных сред
А.А. Паньков, Ю.В.Соколкин (Пермь).....312

Математический анализ гистологических препаратов применительно к ранней диагностике рака молочной железы
И.А. Патрикеев, Р.А. Юрлов (Пермь).....313

Численное моделирование цилиндрического опыта Мешкова по модели турбулентного перемешивания с одним уравнением
А.В. Певницкий, А.Н. Разин, В.К. Фадеев (Саров) 314

Удельная теплоемкость образцов поли-е-капроамида, полученных гидроэкструзией в твердой фазе при различных режимах
Б.Г. Петров, Е.В. Славнов, В.М. Тимофеев (Пермь) 315

Случайные процессы в системах с распределенными параметрами и их анализ
И.Е. Полосков (Пермь) 316

Крупномасштабные течения в турбулентном конвективном слое с подвижным теплоизолятором
Е.Н. Попова, П.Г. Фрик (Пермь) 317

Методы идентификации параметров композиционных и биоматериалов
Н.В. Поспелова (Москва).....318

Моделирование остановки фронта жидкого углеводородного загрязнителя в почве
К. А. Поташев (Казань) 319

Математическое моделирование конвекции в электрохимических системах
А.А Приходько, В.И Елисеев, Н.В Кузнецова (Днепропетровск) 320

Развитие МГД-неустойчивости в канале кольцевого сечения
А.В. Проскурин (Барнаул) 321

Моделирование реологических свойств полимерных материалов
О.А. Путилова, А.Л.Свистков (Пермь) 322

Исследование цепочечных агрегатов в магнитных жидкостях
А.Ф. Пшеничников, А.А. Федоренко (Пермь) 323

О численном моделировании фазовых переходов первого рода в системе сферических диполей
А.Ф. Пшеничников, Ю.М. Язев (Пермь) 324

4-мерный канонический формализм в теории упругости при конечных деформациях
Ю.Н. Радаев (Самара) 325

Колебания магнитоупругой сферы во внешнем поле
Ю.Л. Райхер, О.В. Столбов (Пермь) 326

О роли турбулентности в винтовом динамо
К.-Х. Редлер (Потсдам, Германия), Р.А. Степанов (Пермь) 327

Простая теория водяного зонтика
В.В. Русаков (Пермь).....328

Моделирование и расчет усадки композитного материала при воздействии светового потока
В.И. Самсонов, А.В. Шульгин (Новосибирск) 329

Анализ геомеханических процессов с учетом реологических свойств пород
Н.А. Самоделкина (Пермь) 330

Трансляционное движение коллапсирующих кавитационных пузырьков
Г.Н. Санкин (Новосибирск).....331

Моделирование фазового разделения в растворе полимера в процессе формирования полимерного геля
А.Л. Свистков (Пермь).....332

Метод получения определяющих уравнений вязкоупругих деформируемых материалов и вязкоупругих жидкостей с учетом конечных деформаций среды
А.Л. Свистков (Пермь).....333

Экспериментальное исследование характеристик деформационного процесса на основе анализа изменения рельефа поверхности образцов
О.В. Семенова (Н. Новгород).....334

Об одном методе решения векторных задач дифракции, основанном на аналитических представлениях волновых полей: интегралах Стрэттона – Чу, интеграле Зоммерфельда и ряде Аткинсона – Уилкокса
А.М. Серебренников (Пермь) 335

О бифуркациях режимов вибрационной и тепловой конвекции, порождаемых кривизной полости
Р.Р. Сираев, А.Н. Шарифулин (Пермь).....336

Течение полимерной жидкости в специальных шнеках с продольной циркуляцией
Е.В. Славнов, С.И. Уржунцева, В.И. Янков (Пермь) 337

О моделях эволюции напряженного состояния твердых тел в условиях релаксационного перехода
О.Ю. Сметанников, Н.А. Труфанов (Пермь) 338

Колебательная и параметрическая термомагнитная конвекция в стратифицированных феррожидкостях
Б.Л. Смородин (Пермь), М.И. Шлиомис (Беэр-Шева, Израиль) 339

Автомодельные закономерности эволюции структуры плоской волны напряжений
М.А. Соковиков (Пермь).....340

Математическое моделирование СВС-технологий
Л.С. Стельмах, А.М. Столин (Черноголовка) 341

Критические явления реодинамического происхождения
Л.С. Стельмах, А.М. Столин (Черноголовка) 342

Магнитовязкий эффект и релаксация в магнитной жидкости
В.И. Степанов (Пермь) 343

Оптимизация методов численного интегрирования каскадных моделей
Р.А. Степанов (Пермь).....344

Численное моделирование турбулентных течений с использованием каскадных моделей
Р.А. Степанов, П.Г. Фрик, А.В. Чупин (Пермь) 345

О влиянии скоростей упругих деформаций на докритический рост трещины в упругом нелинейно- вязком материале в среде с поврежденностью в связанной постановке задачи
Л.В. Степанова (Самара) 346

Об одном алгоритме расчета оптимальных остаточных напряжений при жестком нагружении упругого тела
В.В. Стружанов (Екатеринбург).....347

Исследование динамического разрушения надрезанных образцов ПММА при электрическом взрыве проволоки на берегах разреза
Ю.В. Судьенков, А.И. Сусликов (С.Петербург) 348

Погрешность модели Хеле-Шоу
Е.Л. Тарунин (Пермь) 349

Варианты задачи Н.Е. Жуковского о рассеве
Е.Л. Тарунин (Пермь) 350

Конечноэлементная технология дискретизации по времени конечноэлементных уравнений движения в свертках для задач линейной теории упругости
В.Н. Терпугов (Пермь) *351*

Об одной математической модели современных ветротурбин
А.К. Тулепбергенов (Алматы) *352*

Исследование математической модели движения жидкости Фойгта
М.В. Турбин (Воронеж) *353*

Свойства спектра монотонных возмущений небуссинесковской конвекции в горизонтальном слое
М.Ю. Тяглов (Ростов-на-Дону) *354*

О возникновении конвекции изотермически несжимаемой жидкости в горизонтальном слое
М.Ю. Тяглов (Ростов-на-Дону) *355*

Линза NAPL Асимптотический анализ и численное решение для стационарного режима
А.А. Ураскузина, Д.В. Шевченко (Казань) *356*

Термодинамика дисперсных систем в высокочастотном электромагнитном поле
М.А. Фатыхов (Уфа) *357*

Исследование спирально-вихревой неустойчивости, возбуждаемой модельной силой в условиях ламинарной конвекции
А.В. Фирулев (Пермь) *358*

Большие перемещения упругих и упругопластических тел
А.Г. Хакимов (Уфа) *359*

Динамика разрушения преград и конструкций при высокоскоростном внедрении техногенных тел
И.Е. Хорев (Томск) *360*

Метод решения задач с нелинейными законами фильтрации жидкости в трехмерных пластах с большим количеством гидродинамически несовершенных скважин
А.В. Цепаев (Казань) *361*

Влияние циклического нагружения на массобменные процессы в окрестности жесткого включения
А.В. Черепанов (Пермь) *362*

Численное исследование устойчивости конвективного факела в зазоре между горизонтальными коаксиальными цилиндрами
В.И. Чернатынский (Пермь) *363*

Термокапиллярная конвекция в квадратной области при наличии мениска
В.И. Чернатынский (Пермь) *364*

Морфология разрушения, вызываемого реакцией ионного обмена в силикатном стекле
С.А. Чижик (Новосибирск) *365*

Численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в кровеносной системе
А.В. Чичиндаев (Новосибирск) *366*

Экспериментальное исследование тиксотропных свойств наполненных полимеров
В.В. Шадрин (Пермь) 367

Моделирование распространения примеси в пограничном слое атмосферы от холодного источника большой мощности
К.Г. Шварц, В.А. Шкляев (Пермь).....368

Длинноволновая неустойчивость Марангони при неоднородном нагреве
В.П. Шилов (Пермь) 369

Численное моделирование трехмерных газодинамических течений с помощью иерархических динамически адаптивных сеток
М.А. Шубин (Челябинск) 370

Термокапиллярная неустойчивость в слое с внутренним тепловыделением с реалистичными граничными условиями для температуры
В.И. Якушин (Пермь).....371

Структурно–феноменологическая модель роста усталостной трещины в порошковых металлокомпозитах
Е.М. Якушина (Пермь) 372

О возможностях описания разномодульной упругой среды с использованием кусочно-линейных потенциалов
В.М. Ярушина (Владивосток).....373

Высокоэластичные композиционные материалы на основе углеграфитового волокна
Н.Е. Яханова (Уфа).....374

Об одной форме уравнений тепломассопереноса и движения жидкости

Р.Ш. Абиев (Санкт-Петербург)

Уравнения переноса теплоты, вещества часто записывают в виде баланса скорости приращения вещества (теплосодержания), дивергенции потоков на границах объема и распределенных в объеме источников или стоков.

Принято сначала находить пространственное либо пространственно-временное распределение температур или концентраций, а затем по уравнениям типа обобщенного закона Фурье или Фика, учитывающих также конвективный перенос, рассчитывать распределение полных плотностей потоков теплоты или вещества во всем объеме рассматриваемого объекта — твердого тела или движущейся через фиксированный объем жидкой среды. Таким образом, задача переноса обычно решается в два этапа.

Известны методы решения некоторых задач тепломассопереноса, в которых возможен прямой расчет потоков с использованием уравнений с дробной производной; однако они применимы преимущественно к бесконечным или полубесконечным пространственным областям.

В ряде практических случаев нет необходимости рассчитывать распределение температур (концентраций) во всей области, необходимо знать лишь распределение потоков этих величин. При задании граничных условий Неймана можно вообще избежать расчета температур (концентраций). Для этого необходимо располагать уравнением переноса, не содержащим температур (концентраций).

В настоящей работе получено уравнение переноса для потоков теплоты (вещества), позволяющее в некоторых случаях непосредственно рассчитывать их распределение. Аналогичное уравнение было распространено также на задачу движения жидкости. Проведен анализ пяти частных случаев полученных уравнений. В частности, построено уравнение "диффузии" вязких напряжений.

Указанное уравнение использовано нами при численном решении задачи нестационарного течения Куэтта бингамовской жидкости при заданных на границах касательных напряжениях. Вязкое течение этой жидкости вначале происходит в тонком слое вблизи границ, где касательное напряжение превышает начальное сопротивление сдвигу, а центральная часть движется как твердое тело. По мере увеличения касательных напряжений обе области вязкого течения расширяются от границ в глубь жидкости. После того, как касательные напряжения повсюду превысят начальное сопротивление сдвигу, течение становится жидкостным по всей высоте канала. По мере стабилизации поля напряжений процесс разгона слоев жидкости прекращается, и профиль скорости стремится к линейному.

Исследование кручения вязкоупругого цилиндра при конечных деформациях и сложном нагружении

А.А. Адамов, М.Н. Галкина (Пермь)

Экспериментально исследовано и описано поведение цилиндрических образцов резины в режимах с кинематическим нагружением по двум независимым параметрам: осевому относительному перемещению одного из захватов относительно другого (реализация растяжения-сжатия) и аналогичному относительному угловому перемещению захватов (реализация кручения в разных направлениях). Эксперименты выполнены при комнатной температуре на нестандартной установке СН-3, разработанной и изготовленной в ИМСС УрО РАН. Модель вязкоупругого поведения несжимаемого материала идентифицирована по результатам испытаний данных образцов на этой установке при одноосном напряженном состоянии.

Программа испытаний включала опыты с циклическими историями деформирования по каждому параметру нагружения и с комбинациями их совместного изменения. В опытах кручения с разгрузками были получены новые интересные проявления эффекта Пойнтинга – осевая сила из области отрицательных значений (состояние сжатия) не переходила в область положительных величин при сохранении длины образца постоянной. Эти экспериментальные результаты удовлетворительно описаны с помощью аналитического решения задачи для бесконечно длинного цилиндра.

Влияние времени на процессы пластического деформирования сталей при комнатной температуре

Н.С. Адигамов (Бишкек)

Современная интерпретация опытных данных позволяет выявить ряд особенностей управления процессами необратимого деформирования материалов. Многочисленные результаты (P – q)-опытов показали, что при комнатной температуре и низких скоростях деформаций происходят определенные закономерные явления, связанные с влиянием временных эффектов. Здесь, в первую очередь следует отметить несимметричность схемы деформирования, локализацию деформаций и влияние фактора времени в зависимости от пути сложного нагружения. Так, при изломах траектории нагружения происходят такие изменения в поведении материала, при которых начинают действовать различные механизмы процесса пластического деформирования, которые, в свою очередь, соответствуют возможности образования пространственно - временных диссипативных структур. Многие исследователи отмечают явление задержки пластического деформирования в начале нагружения и роста деформаций после окончания нагружения. Характерным примером проявления эффектов замедленного деформирования и разрушения (например, скачкообразного роста трещин) является усталостное разрушение. “Понятие времени намного сложнее, чем это кажется”, – отмечают в своих исследованиях представители школы И.Р. Пригожина. Время, связанное с движением (деформациями), – лишь первый из многих аспектов этого понятия, который обычно включается в схему теоретических построений при исследованиях ползучести материалов. Одним из поразительных результатов, мимо которых нельзя пройти при анализе нелинейных явлений, является появление “второго времени”, глубоко связанного с изменениями внутреннего состояния материала (эволюцией структурообразования) при соответствующих изменениях параметров Лоде – Надаи μ_σ и $\mu_{\Delta\sigma}$. В процессах пластического деформирования, когда по одним площадкам действия экстремальных касательных напряжений идет нагружение, а по другим – частичная разгрузка (режим “неполной пластичности” по Т. Карману), переход материала из одного состояния в другое происходит без заметного влияния времени. И наоборот, при реализации режимов “полной пластичности” имеет место (как и отмечают многие исследователи) явления “запаздывания пластических деформаций”. Таким образом, при изменении параметров догружения и реализации режимов полной и неполной пластичности время оказывает существенное влияние на эволюцию системы. При этом механизм пластической деформации (и в дальнейшем подготовка и развитие разрушения) в работе отражен наиболее просто при сложных условиях нагружения.

Релаксация внутренних напряжений в наполненых эпоксидных смолах

А.С. Ажеганов, Д.А. Горинов, К.А. Сеник, Н.К. Шестакова (Пермь)

Метод ЯКР на наполнителях дает возможность исследовать сверхмедленные процессы в полимерных композитных материалах, недоступные для изучения другими методами. Спектр времен релаксации напряжений в полимерах очень широкий, ввиду различия в подвижности кинетических единиц от звеньев цепи до надмолекулярных структур. Для описания экспериментально наблюдаемого релаксационного процесса следует ввести, по крайне мере, два времени релаксации: τ_α – медленной, τ_β – быстрой. С понижением температуры времена релаксации напряжений растут экспоненциально и при комнатной температуре достигают нескольких лет. Для исследования столь медленно протекающих процессов необходим высокостабильный датчик напряжений. В данной работе роль такого датчика выполняют кристаллы, содержащие квадрупольные ядра.

Давление полимерной матрицы P_i на поверхности кристаллов вызывает пропорциональное изменение частоты ЯКР. Оно равно нормальной компоненте тензора напряжений в матрице у поверхности кристаллов $P_i = \sigma_{rr}$.

В исследуемые образцы эпоксидных смол ЭД-10 и ЭД-16, отвержденных ПЭПА, в качестве наполнителя был введен порошок закиси меди Cu_2O в различной концентрации.

Начиная с момента ~ 10^6 с, процесс релаксации идет со значительно большей постоянной времени. Найдены времена “медленной” и “быстрой” релаксаций. При комнатной температуре времена “медленной” и “быстрой” релаксаций отличаются на три порядка.

Шесть образцов эпоксидной смолы ЭД-10 с различными концентрациями порошка закиси меди хранились 7 лет при комнатной температуре. За этот период было сделано несколько измерений частоты ЯКР, которые показали экспоненциальный характер изменения напряжений в материале. Найдены времена “медленной” релаксации τ_α. Они оказались зависящими от концентрации наполнителя.

Проведены исследования релаксации напряжений при одноосной диформации. Процесс релаксации проявлял явный двухэкспоненциальный характер. Времена “медленной” τ_α и “быстрой” τ_β релаксации уменьшаются по мере приближения к температуре стеклования и отличаются между собой приблизительно на порядок. Интересно отметить, что деформация образца ЭД-20 при температуре T=403 К, определенной дилатометрическим методом как температура стеклования смолы, вызывала появление медленно релаксирующих значительных по величине напряжений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-01-96413).

Несимметричное взаимодействие вихрей в турбулентном течении

И.Ю. Азизова, А.Ж. Турмухамбетов (Караганда)

С точки зрения синергетики, турбулентность представляет собой процесс самоорганизации, приводящей к образованию вихрей и их кластеров в возмущенной среде, т.е. к образованию порядка из хаоса [1-3].

Турбулентному течению, как стохастической системе, присуще особое свойство – перемежаемость, проявляющееся как чередование мелкомасштабных пульсаций динамических характеристик (скорости, давления и т.д.) с всплесками крупномасштабных пульсаций с относительно большими амплитудами. Наблюдаемая в эксперименте перемежаемость в турбулентных средах обусловлена прохождением через фиксированные точки пространственно разделенных вихреобразований в различных формах и фазах их эволюций. Поэтому, следуя, к примеру, работе [6], можно ввести достаточно точно определяемую количественную динамическую характеристику – степень перемежаемости

$æ=l/d_0$; $0 \le 1/æ \le 1$,

где l – расстояние между центрами вихрей, $d_0=2r_0$ – диаметр ядра вихрей. Идея о самоорганизующейся природе перемежающихся вихревых структур указывает на возможную универсальность внутреннего параметра æ, а не внешних геометрических масштабов течения. Знание реализуемых значений æ позволяет указать определенный тип турбулентного движения.

В отличие от известных исследований, в докладе рассматривается несимметричное взаимодействие двух вихрей вязкой жидкости с учетом направлений их вращения.

Исходя из квазидвумерной модели турбулентности, с помощью достаточно простых методов рассчитаны численные значения минимальных и максимальных масштабов перемежаемости в системе отсчета, относительно которой центры вихрей неподвижны.

1. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. – М.: Наука, - 1990. – 320 с.

2. Жанабаев З.Ж. Лагранжево описание однородной турбулентности. //ЖЭТФ, 1992, т. 102. – С.1825-1837.

3. Жанабаев З.Ж., Тарасов С.Б., Турмухамбетов А.Ж. Фракталы. Информация. Турбулентность. – Алматы: РИО ВАК РК, - 2000. – 228 с.

4. Кузьмин Г.А., Лихачев О.А., Паташинский А.З. Структурная турбулентность в свободном сдвиговом слое // Структурная турбулентность. Под.ред. Гольдшика М.А. – Новосибирск: - 1982. – 166 с.

Численное моделирование турбулентного горения в топочных камерах, оборудованных системами плазменного воспламенения

Ж.Ж. Аканова, Е.И. Лаврищева (Алма-Ата, Казахстан)

Исследования процессов конвективного тепломассопереноса в реагирующих средах, происходящих при сжигании пылеугольного топлива в топочных камерах ТЭС, приобретают особую актуальность в связи с сокращением использования жидкого топлива, являющегося ценным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности, и расширением применения твердых топлив. Исследуемая плазменная технология сжигания углей и компьютерное моделирование процессов, происходящих внутри топочного пространства камер сжигания, являются новыми и эффективны при сжигании всех типов углей, используемых на ТЭС. Численное моделирование турбулентных течений с химическими реакциями, включающее термодинамическое, кинетическое и трехмерное компьютерное моделирование топочных камер, позволит с наименьшими затратами детально исследовать турбулентное горение пылеугольного топлива в реальных камерах сгорания и дать практические рекомендации по использованию новой технологии плазменной обработки низкосортного твердого топлива.

При термохимической плазменной подготовке топлива пылеугольный поток разделяется на две части, одна из которых нагревается электродуговой плазмой до температуры практически полного выделения летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Тем самым из части аэросмеси (уголь + воздух), прошедшей зону электродугового разряда, получают высокореакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток), способное воспламеняться при смешении с оставшимся потоком аэросмеси и стабилизировать процесс горения. В отличие от обычных горелок, в топку поступает факел реагирующей топливной смеси, что вызывает изменение основных параметров процесса горения.

В работе проведено численное исследование влияния плазменной подготовки на сложные физико-химические процессы, происходящие при сжигании обработанного угля в камерах сгорания. Математическая модель, описывающая реагирующие течения в камере сгорания, включает в себя нелинейные дифференциальные уравнения: уравнения неразрывности, движения вязкой среды, распространения тепла и диффузии для компонентов реагирующей смеси и продуктов реакции, уравнения состояния и уравнения химической кинетики. Решение этих уравнений проводилось на базе программного комплекса для трехмерного моделирования FLOREAN. В результате проведенных вычислительных экспериментов получены поля температуры и концентраций продуктов реакции (co, co_2, o_2, no_x и т.д.). Показано положительное влияние плазменной подготовки на процесс горения низкосортного угля.

Численное исследование переноса тяжёлой примеси с облаком горячего газа в атмосфере

А.В. Аксаков (Ижевск)

Сценарий переноса примеси в атмосфере с облаком горячего газа условно можно разделить на четыре этапа:

- мгновенное выделение большого количества тепла в результате пожара или взрыва;
- формирование и подъём облака;
- перенос облака с примесью.

В данной работе нас интересует вторая стадия.

На этапе формирования подъёма облака происходят частичное осаждение наиболее тяжёлых фракций примеси и возникновение устойчивой структуры в виде вихревого кольца, характерной для данного типа процессов. Подъём продолжается до тех пор, пока существует положительная плавучесть, вызванная более высокой, чем в окружающей атмосфере, температурой ядра термика. После снятия перегрева и распада термика, распространение примеси в атмосфере можно рассчитывать по хорошо апробированным полуэмпирическим и эмпирическим моделям.

Расчёт плотности температуры и скоростей потоков газа в облаке проводился численным интегрированием по времени полных уравнений Навье – Стокса с заменой коэффициента молекулярной вязкости на полуэмпирический коэффициент турбулентной вязкости, который вычислялся по уравнениям $K-\varepsilon$.

Метод дискретных особенностей в задачах теории фильтрации

А.А. Аксюхин (Орёл)

Разрешение практически важных проблем теории фильтрации, таких как разработка нефтяных и водных месторождений, строительство гидротехнических сооружений, мониторинг и охрана окружающей среды от загрязнения, требует создания новых математических моделей течений вязкой жидкости в неоднородных средах. Развитые теория функций комплексного переменного и теория потенциала для уравнений эллиптического типа [1] позволяют исследовать в конечном виде лишь ограниченный класс плоскопараллельных, двумерных и осесимметричных задач фильтрации.

Предлагаемый для исследования двумерной и трёхмерной фильтрации численный метод дискретных особенностей позволяет значительно расширить класс решённых задач. Суть этого метода заключается в следующем: ставится граничная задача о напорной линейной фильтрации несжимаемой жидкости постоянной вязкости к системе совершенных (или в трёхмерных задачах – несовершенных) скважин, работающих в изотропной неоднородной среде вблизи стационарных границ сопряжения, питания и непротекания, а также сингулярных границ (проводимость слоя на которых обращается в ноль или бесконечность). Основными уравнениями являются дифференциальное уравнение эллиптического типа, выражающее закон Дарси, и уравнение неразрывности. Согласно [2], использование квазипотенциалов двойного слоя позволило свести задачу к системе неоднородных интегральных уравнений второго рода типа Фредгольма, записанных на границах сопряжения и питания, и интегральных соотношений, количество которых совпадает с числом скважин. Полученная система интегральных уравнений и соотношений решается численно путём сведения к системе алгебраических уравнений. При этом границы моделируются, как показано в работе [3], дискретными источниками (стоками), вихрями или другими особенностями.

Реализация предложенного метода с использованием персональных компьютеров с процессорами Pentium-I и II позволила исследовать большое количество конкретных двумерных и трёхмерных граничных фильтрационных задач о дебитах скважин, работающих в неоднородных слоях с различными законами проводимости (или проницаемости) [2].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-01-00063 и № 02-01-06460).

1. Пивень В.Ф. Функции комплексного переменного в динамических процессах. Орел. Изд-во Орловского пединститута. 1994. 148 с.

Математическая модель адаптационных процессов в костных тканях нижней конечности человека

Ю.В. Акулич, Р.М. Подгаец, А.В. Сотин (Пермь)

Применение классической теории пористой упругой приспосабливающейся среды [1,2] к решению прикладных задач встречает серьезные трудности, в виду необходимости длительного экспериментального (клинического) определения структуры и компонент тензора адаптации в эволюционном (кинетическом) уравнении, описывающем изменение плотности костной ткани при отклонении тензора деформации от его гомеостатического значения. С помощью построения феноменологического уравнения среды, следующего из этой теории и аналогичного по форме, но использующего новое эволюционное уравнение, установлена структура и получены аналитические выражения компонент нового тензора адаптации. Этот тензор связывает в предложенном эволюционном уравнении изменение тензора упругих свойств с отклонением интенсивности деформации от ее гомеостатического значения. Поэтому структура предложенного тензора адаптации совпадает со структурой тензора упругих свойств, если предположить, что в процессе адаптации не происходит смена вида анизотропии. Это предположение справедливо для большинства хирургических восстановительных и реабилитационных технологий. Аналитические выражения компонент тензора адаптации получены как для губчатой, так и для плотной костной ткани. Структуру губчатой костной ткани образуют поры сферической формы в твердом матриксе. В процессе адаптации изменяется радиус пор по линейному закону (такому же, как и для губчатой костной ткани) в зависимости от отклонения интенсивности деформации от ее гомеостатического значения, полученного аппроксимацией известных экспериментальных данных об активности костных клеток. Структура плотной костной ткани состоит из пор цилиндрической формы и твердого матрикса. Выражения компонент тензора адаптации содержат производные технических модулей упругости по радиусу пор. Для губчатой костной ткани (изотропный материал) производная модуля упругости определена по известным экспериментальным данным (коэффициент Пуассона – постоянный). Для плотной костной ткани, являющейся транстропным материалом в бедре и ортотропным в голени, производные определялись по данным численных экспериментов на растяжение и кручение соответствующих «образцов». Представлены решения тестовых одномерных задач адаптации в обоих видах костной ткани.

1. Cowin S.C. and Hegedus D.H. Bone remodeling I: theory of adaptive elasticity. J. of Elasticity, Vol. 6, No. 3, July 1976, pp. 313-326.

2. Hegedus D.H. and Cowin S.C. Bone remodeling II: small strain adaptive elasticity. J. of Elasticity, Vol. 6, No. 4, October 1976, pp. 337-352.

Исследование напряженно-деформированного состояния кирпичной кладки стен в стадии эксплуатации

А.Н. Акулова, Г.Г. Кашеварова, Г.Г. Новопашина (Пермь)

Для определения напряженного состояния кладки несущих стен в существующих зданиях обычно применяют натурные испытания. Результаты носят фрагментарный характер, так как испытания выполняются на образцах небольших размеров, извлеченных из ненапряженных участков стен. Проследить на таких образцах механизм развития деформаций кладки, особенно с учетом наличия трещин, задача трудно выполнимая. При определении состояния стен существующих зданий целесообразно использовать современные методы анализа, в частности, метод конечных элементов.

Для оценки допустимости повреждения каменных стен зданий в ПГТУ разработана универсальная программа расчета зданий с учетом совместной работы с фундаментом и основанием. Программа создана на языке параметрического программирования APDL, встроенном в программный конечно-элементный комплекс ANSYS. Использование метода субмоделирования – выделение из конструкции фрагмента и уточнение результатов грубого расчета с использованием более мелкой конечно-элементной разбивки в субмодели - позволило перейти к анализу НДС в отдельных камнях и швах каменной кладки.

Компьютерная модель кирпичной кладки представлена объемными конечными элементами со свойствами камня и раствора в соответствии с принятой системой перевязки и с учетом НДС окружающих участков стен. При разрушении, в соответствии с критерием Гаусса, элементы, где происходит локальное разрушение, исключаются из работы.

Принятая в практике проектирования строительных конструкций методика расчета по предельным состояниям учитывает усредненные свойства материалов при нагружении, описывая поведение материала в зависимости от приложенной внешней нагрузки. При анализе поврежденной конструкции поведение материала под нагрузкой определяет не приложенное внешнее воздействие, а локальное напряженное состояние. Предлагаемая модель позволяет оценить напряженно-деформированное состояние в узлах и элементах модели поврежденной кладки.

Пространственная работа кладки стен эксплуатируемых зданий в различные моменты времени с учетом разного вида поврежденности определяется с целью выявления характеристик несущей способности, оценки реальной несущей способности и остаточного ресурса эксплуатируемого здания. Анализируя расчеты поврежденных конструкций, можно выбрать рациональное решение по усилению, определив усилия обжатия или величину разгружающей силы, передаваемой на новую конструкцию, разгружающую поврежденный элемент.

Колебания стесненной капли под воздействием касательных вибраций твердых торцов

А.А. Алабужев, Д.В. Любимов (Пермь)

Работа посвящена изучению поведения плавающей жидкой зоны в вибрационном поле. Рассматриваются собственные и вынужденные колебания, а также средняя деформация капли жидкости, находящейся в другой жидкости и ограниченной двумя параллельными твердыми плоскостями, под действием вибраций, перпендикулярных оси. Амплитуда внешних колебаний и высота капли предполагаются малыми по сравнению с равновесным радиусом капли. Равновесный краевой угол между поверхностью капли и стенкой отличен от прямого.

В работе [1] при рассмотрении свободной контактной линии было найдено, что капля, в среднем, сжимается вдоль оси вибраций, независимо от соотношения плотностей. Необычный характер изменения средней формы почти цилиндрической капли был обнаружен экспериментально в работе [2]: тяжелая капля вытягивалась вдоль оси вибраций, а легкая - сжималась.

Учет динамики контактного угла для вырожденного случая равновесного угла, равного 90°, в условиях невесомости продемонстрировал принципиальную возможность вытягивания тяжелой капли [3].

В данной работе учитывается динамика контактной линии аналогично [3]: на ограничивающих поверхностях поставлено граничное условие, предполагающее линейную связь между скоростью движения контактной линии и краевым углом [4].

Найдена равновесная форма капли в условиях микрогравитации и в поле тяжести. В приближении малой высоты капли получено аналитическое выражение.

При конечных значениях капиллярного параметра диссипация на линии контакта сред приводит к затуханию свободных колебаний и ограничению максимальной амплитуды вынужденных колебаний в резонансе, а также к сдвигу резонансной частоты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-01-06365-мас и № 01-01-00443), Программа поддержки ведущих научных школ (грант № 00-15-96112) и CRDF (грант № PE 009-0).

1. Алабужев А.А., Любимов Д.В., Коновалов В.В. Вибрационные эффекты в гидродинамике: сб. статей. Вып. 1. Пермь: изд-во Перм. ун-та, 1998, с. 7-16.

2. Зорин С. В., Иванова А. А., Козлов В. Г. Там же, с. 109-119.

3. Alabuzhev A., Lyubimov D. Proc. of XXIX Summer School "Advanced Problems in Mechanics", St. Peterburg, 2001 pp. 3-10.

4. Hocking L.M. J. Fluid Mech., 1987, v.179, pp. 253-266.

Характер разрушения при ветвлении трещины в аморфных полимерах

А.А.Алексеев, А.И. Левин, А.С. Сыромятникова (Якутск)

Для изучения перехода от прямолинейного распространения трещины к режиму ветвления были проведены экспериментальные работы по статическому нагружению образцов из полиметилметакрилата (ПММА). Были проведены механические испытания по динамическому распространению трещины в ПММА с режимом ветвления при различных температурно-временных условиях и фрактографический анализ динамического распространения трещины в ПММА при ее прямолинейном распространении и в режиме ветвления.

Эксперименты была проведены на универсальной разрывной машине INSTRON серии IX модели 4483. Проводились испытания на растяжение плоских образцов из ПММА с размерами 120x120x4 мм и 150x150x4 мм при температурах 20 ^{0} С, -50 ^{0} С. На образцы наносились инициаторы трещин шириной 1 мм, глубиной 3 мм с радиусом закругления в вершине трещины 0,1 мм. Охлаждение проводилось в температурной камере «INSTRON»-а до температуры -50 ^{0} С. При достижении заданной температуры производилось нагружение образца со скоростью v=1 мм/мин до разрушения. В ходе эксперимента на 7 образцах из 10 получено ветвление трещины.

Проведен фрактографический анализ изломов образцов на растровом электронном микроскопе XL-20 Philips. Получена картина продвижения трещины по всей длине образца, которая позволяет проанализировать различные этапы продвижения трещины. На изломах образцов обнаружены четыре области – зеркальная, перьевая, шероховатая и ступенчатая.

На изломах образцов обнаружены четыре зоны – зеркальная, матовая, перьевая и ступенчатая. Установлено, что при высоких скоростях распространения трещины область, предшествующая её ветвлению, характеризуется зеркальным рельефом, переходящим в ступенчатый. Резкое замедление распространения основной трещины в результате ветвления, при котором часть упругой энергии системы расходуется на формирование области предразрушения вторичной трещины, приводит к появлению зеркальной зоны в области ветвления трещины.

Все ступеньки имеют один вид, периодичны. Средние размеры ступенек порядка 30 мкм. Ступеньки расположены перпендикулярно фронту распространения трещины. Ступенчатая область периодична: сначала появляются мелкие бороздки, которые сливаются в линии, а линии – в ступеньки со средними размерами в десятки микрон.

Ступенчатый рельеф поверхности разрушения образуется в результате взаимодействия фронтов магистральной и вторичной трещины, и соответственно, расстояние между бороздками определяется соотношением скоростей магистральной и вторичной трещины.

Использование метакаталогов для создания справочной системы научного института

А.Н. Алексеев, А.Г. Масич, Г.Ф. Масич, А.В. Созыкин (Пермь)

В каждом научном институте накоплены большие объемы информации, подлежащие представлению в Интернет. Сюда входят справочные сведения о сотрудниках института, публикации, отчеты, результаты экспериментов. Но представление этих данных в Интернет осложнено тем, что для их хранения используются различные хранилища и форматы [1]. Так, сведения о научных работниках могут храниться в реляционных СУБД или каталогах LDAP, публикации, отчеты и результаты экспериментов – в текстовых, бинарных или графических файлах. Из всего этого разрозненного набора данных необходимо сформировать единое интегрированное представление.

По мнению авторов, формирование единого представления возможно с использованием технологии метакаталогов, становящейся все более популярной в последнее время.

Метакаталог – это механизм, позволяющий синхронизировать данные между различными хранилищами [2]. Метакаталог может взаимодействовать с различными хранилищами данных, соответствующие программные модули называются коннекторами. В имеющихся сегодня на рынке метакаталогах поддерживается взаимодействие с каталогами LDAP, СУБД, текстовыми и бинарными файлами, xml и т.д. Метакаталог может формировать метапредставление – выделенное хранилище, в котором собираются все данные из присоединенных хранилищ.

В докладе рассматривается архитектура справочной системы научного института, использующая метакаталог. Метакаталог конфигурируется так, чтобы получить единое интегрированное представление данных из разных хранилищ, используемых в научном институте. К этому объединенному представлению обеспечивается доступ через Интернет (с использованием WEB-интерфейса) с помощью java-сервлетов и JSP.

Метакаталог предоставляет возможность обеспечить доступ к объединенному представлению данных не только через WEB, но и различными другими способами: LDAP, xml и т.д. Также использование метакаталогов позволяет осуществить интеграцию справочной системы с системой сетевого управления.

1. Бездушный А.Н., Ковалев Д.А., Филиппова А.А. Использование протокола LDAP для поддержки распределенности гетерогенных информационных систем // Труды Второй Всероссийской научная конференция «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции». – Протвино. – 2000. – С. 117-128.

2. Шабат В. Каталоги LDAP и метакаталоги. // Открытые системы, № 5, 2002.

Об устойчивости адвективного течения во вращающемся горизонтальном слое жидкости при малом значении числа Прандтля

Е.А. Алексеева, К.Г. Шварц (Пермь)

Исследуется устойчивость адвективного течения во вращающемся горизонтальном слое несжимаемой жидкости, ограниченном твердыми плоскостями $z = \pm h$ и вращающемся с постоянной угловой скоростью Ω_0. Ось вращения совпадает с вертикальной осью координат z. На обеих границах задана температура, линейно меняющаяся с координатой x: $T = Ax$, где A - постоянный градиент. Исследование проводится на основе уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска во вращающейся системе отсчета в декартовой системе координат для случая, когда центробежной конвективной силой можно пренебречь. Исследования проводились при малом значении числа Прандтля (Pr = 0.1). Изучалось влияние вращения на характер устойчивости течения при различных значениях числа Тейлора.

Для исследования линейной устойчивости стационарного адвективного течения во вращающейся жидкости использовался метод малых возмущений. Для численных расчетов применялся двухполевой метод.

В результате численного решения сеточной задачи было показано, что вращение повышает устойчивость адвективного течения, не меняя монотонный характер неустойчивости. Получены зависимости критического числа Грасгофа и волнового числа от числа Тейлора, построены нейтральные кривые.

Анализ напряженно – деформированного состояния при осаживании трубной тонкостенной заготовки

О.А. Алексеенко (Самара)

Осуществления теоретического решения для процесса осаживания трубной заготовки конической матрицей получены из теории пластического течения анизотропных материалов [1]. При этом были введены следующие допущения. Основными из них являются:

Материал трубной заготовки – жесткопластический, несжимаемый, трансверсально - изотропный, т. е. показатели анизотропии осреднены [2]. На коническом участке очага деформации в системе координат $\rho z\theta$ реализуется осесимметричное напряженное состояние.

2. Упрочнение материала заготовки описывается степенной зависимостью

3. Условие пластичности Треска – Сен-Венана принимаем в виде

$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta\sigma_s$

где β – коэффициент Лоде, $\beta = 1$.

Записав уравнение равновесия с учетом изменения толщины стенки трубной заготовки в процессе осаживания (в первом приближении оно считалось линейным), а также используя условие пластичности и формулу Лапласа, было найдено поле напряжений. Далее, используя уравнения связи, методом пересчета найдено поле деформаций.

Предельная степень деформации при осаживании трубной тонкостенной заготовки определяется моментом ее разрушения, так как потеря устойчивости за счет складкообразования может быть исключена специальной конструкцией инструмента. В качестве технического показателя предельного формоизменения заготовок используется коэффициент вытяжки. В связи с этим проведен анализ изменения коэффициента вытяжки от показателей анизотропии.

В работе показано влияние анизотропии и условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и трубной заготовки на формоизменение при осаживании и геометрические характеристики инструмента.

1. Арышенский Ю. М., Гречнеков Ф. В. Теория и расчеты формоизменения анизотропных материалов. М.: Металлургия, 1990. – 304 с.

2. Аверкиев Ю. А., Аверкиев А. Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

Расчет эффекта Ранка-Хилша

О.Н. Аликина, Е.Л. Тарунин (Пермь)

Эффект Ранка-Хилша или вихревой эффект состоит в разделении закрученного потока газа, подаваемого в трубку, на два. Разделение потоков реализуется в простом устройстве, названном его первооткрывателем Ж. Ранком вихревой трубой (ВТ). Один из потоков (приосевой) имеет температуру ниже температуры входящего потока, а другой (периферический) – выше. Эффект до сих пор привлекает внимание исследователей: как теоретиков, так и экспериментаторов. Величина эффекта температурного разделения вычисляется как разность между температурами торможения на выходах вихревой трубки.

Проведены исследования ламинарного двумерного течения на основе полных уравнений для вязкого идеального теплопроводного газа. Исследования проводились на основе разностного метода и позволили выяснить эффект температурного разделения в зависимости от различных параметров задачи и метода. К числу основных параметров задачи относятся число Рейнольдса, задаваемый перепад давления (отношение давлений на входе и выходах вихревой трубки), длина вихревой трубки, величина и угол наклона соплового входа, размеры выходных отверстий (дроссельного и диафрагменного).

Отметим, что выполненные вычислительные эксперименты требуют больших затрат машинного времени из-за сложности задачи и большого числа параметров.

Вычислительные эксперименты показали, что эффект температурного разделения увеличивается:

- при увеличении числа Рейнольдса со 150 до 450 и достигает своего максимального значения в ≈300К при числе Рейнольдса равном 450;

- при увеличении длины трубки вдвое повышается на 12%;

- при увеличении угла наклона входного потока;

- при увеличении величины диафрагменного выхода и при уменьшении зазора дроссельного выхода.

Значительное влияние на величину доли холодного потока оказывает увеличение длины вихревой трубки (увеличивается на 17%), и увеличение радиусов дросселя и диафрагмы (повышается на 20%).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96402) и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № РЕ-009-0).

Несжимаемые среды – математические модели и проблемы численного решения

П.А. Ананьев, П.К. Волков, А.В. Переверзев (Калуга)

Прямая дискретизация уравнений Навье-Стокса обычно приводит к медленно сходящемуся итерационному процессу по нелинейности. Использование монотонных балансных нейтральных разностных схем, предобуславливателей, монотонизирующих регуляризаторов, разнесенных и частично разнесенных сеток для скоростей и давления и др. позволяет получать устойчивые по времени монотонные схемы. Однако сходимость и точность зависят от класса решаемых задач, от способа дискретизации.

Применение МКЭ к решению совместной системы ДУ при аналитическом вычислении интегралов приводит к СЛУ с матрицей, имеющей число ноль собственным числом с кратностью, равной количеству неизвестных функции давления. Приближенное вычисление интегралов или, в большей степени, использование полиномов разного порядка для аппроксимации скоростей и давления приводит к некоторому малому сдвигу спектра от нуля. Это дает плохообусловленную матрицу и создает возможность получения решения в медленно сходящемся итерационном процессе. Данное решение будет некоторым приближением, поскольку получаемая матрица не будет эквивалентна исходной, вырожденной. Степень приближения при этом не определена. Сказанное справедливо в случае применения абсолютно любых типов элементов в двух- и трехмерном случаях.

Очевидно проблема связана с фундаментальным свойством вырожденности уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Линейная задача Стокса также обладает указанным свойством. Анализ спектра матрицы совместной системы однозначно указывает на условие несжимаемости как причину вырожденности.

Обоснована регуляризация уравнения неразрывности несжимаемой жидкости с новым независимым параметром регуляризации, имеющим физическую природу.

Разработан метод решения регуляризованных уравнений Эйлера, Навье-Стокса и Обербека-Буссинеска на основе МКЭ, дающий наиболее точное решение, сравнимое с точностью спектральных методов. Тестирование на международных бенчмарках и сравнение с экспериментальными данными выявляет лучшие качества численного алгоритма как по точности, так и по сходимости, а также отсутствие схемной вязкости.

Существующие решения по различным схемам МКР классифицируются по величине параметра регуляризации. Т.е. МКР дает решения некоторых регуляризованных уравнений несжимаемой жидкости с параметром, который явно не выписан. Это объясняет имеющийся большой разброс в решениях разных авторов и невозможности их сближения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Калужской области (гранты № 00-01-96004 и № 01-01-96021).

Ионно-лучевая обработка ПЭ волокон и механические характеристики полимерных композитов на их основе

А.Н. Аношкин (Пермь), Н.В. Гаврилов (Екатеринбург), А.Ю. Гордеева, В.А. Огородников, Д.Э. Якушева, Р.М. Якушев (Пермь)

ПЭ волокна, получаемые методом гель-технологии, обладают высокими удельными механическими характеристиками и представляются весьма перспективным армирующим материалом для полимерных композитов. Однако традиционные, например, эпоксидные связующие имеют низкую адгезию к ПЭ волокну, поэтому механические характеристики армированных пластиков на их основе не достигают потенциально возможного высокого уровня. Для повышения межфазного взаимодействия применяют различные методы химической и физической модификации контактирующих фаз. В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния ионно-лучевой обработки ПЭ волокон на адгезию к олигомерным связующим и механические свойства композитов на их основе. Образцы ПЭ волокон в виде тканого материала обрабатывались с обеих сторон пучком ионов азота с энергией 30 кэВ. Доза облучения составляла 10^{14}-10^{16} ион/см^2. Спектральный анализ облученных волокон показал, что на их поверхности образуются ненасыщенные и кислородсодержащие функциональные группы. Электронно-микроскопический анализ свидетельствует о когезионном характере разрушения на границе волокно - матрица в случае облученных волокон. Механические испытания на расслоение ПЭ ткани с различными адгезивами показали, что даже при незначительной дозе облучения волокна наблюдается повышение разрушающего напряжения в 1,5 – 2 раза. Суммируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что ионно-лучевая обработка ПЭ волокна способствует повышению межфазного взаимодействия между волокном и связующим за счет образования химических связей на границе раздела фаз.

Для прогнозирования механических характеристик пластиков с ПЭ волокнами использовалась структурно-феноменологическая модель. Рассматривались пластики с однонаправленной схемой армирования. Напряжения и деформации в матрице и волокнах композита при поперечном нагружении и сдвиге определялись из решения задачи микромеханики методом локального приближения. Условия нагружения на границе фрагмента задавались таким образом, чтобы напряжения, осредненные по центральной ячейке фрагмента, равнялись заданным макроскопическим. В результате осреднения полученных структурных полей напряжений и деформаций построены диаграммы деформирования и получены оценки пределов прочности композита при продольном и поперечном растяжении и сдвиге. Проведен анализ влияния адгезионной прочности между волокном и матрицей на механические свойства композита.

Исследование напряженно-деформированного состояния и конструктивное совершенствование композитных электроизолирующих муфт магистральных газопроводов

А.Н. Аношкин, Г.Я. Захаров, В.И. Ломаев, К.А. Покатаев, А.К. Сироткин (Пермь)

Стеклопластиковые электроизолирующие муфты (ЭИМ) являются несамостоятельными элементами катодной защиты от гальванокоррозии магистральных и технологических подземных трубопроводов (Ду до 1400 мм, Ру до 10 МПа), отделяющие заземленные промплощадки от незаземленной линейной части трубопровода, обеспечивая поддержание на трубе нужного низковольтного защитного потенциала. Отсутствие ЭИМ приводит к “стеканию” защитного тока с трубопровода через заземление промплощадок (перекачивающих станций, электроприводных задвижек и пр.) и необходимости увеличения напряжения, подаваемого от катодных станций (иногда в десятки раз), что значительно повышает энергозатраты организаций, эксплуатирующих трубопроводы.

Силовая схема моноблочной стеклопластиковой ЭИМ, разработанной и внедренной в промышленную практику ДАО “Оргэнергогаз” РАО “Газпром” (патент РФ № 2084745), заключатся в зацеплении стклопластиковых продольных комплексных жгутов за кольцевые выступы (бурты) из гнутых прутков, приваренных соттветствущими парами в 2…3 ряда к стыкуемым патрубкам, разделенным диэлектрической уполтнительной вставкой. Герметичность муфт обеспечивается резиновым уплотнением.

Целью настоящей работы является совершенствование конструкции стеклопластиковых электроизолирующих муфт с целью снижения материалоемкости, трудоемкости и стоимости.

Для рационального проектирования ЭИМ разработана математическая модель, описывающая сложную схему армирования конструкции, анизотропию слоев. С помощью разработанного программного комплекса проведены расчеты нескольких вариантов композитных конструкций электоризоляционных муфт, на основе которых выбрана наиболее рациональная схема армирования и конструктивный вариант крепления муфты. Особенность предложенной схемы ЭИМ заключается во включении в конструкцию пластика, охватывающего выступы патрубков, кольцевых гнутых Г-образных стальных накладок. Это увеличивает кольцевую жесткость муфты, позволяет уменьшить количество продольных слоев пластика в несколько раз и перейти только к одной паре буртов.

Сформированы технические предложения по созданию на базе ФГУП “Завод Машиностроитель” (Пермь) опытных образцов новых электроизолирующих муфт, обладающих более низкой себестоимостью и обеспечивающих экономические предпосылки более широкого внедрения данных муфт в практику строительства трубопроводов.

Исследование механических свойств полиэтилена в условиях низких температур

А.Н. Аношкин, А.Ф. Ларионов, А.Б. Поспелов, Р.М. Якушев (Пермь)

Объектом исследования является полиэтилен низкого давления марки 273-79, используемый в качестве герметизирующего слоя бипластмассовых труб. Практика использования бипластмассовых труб в зимний период в условиях Западной Сибири и Крайнего Севера выявила случаи хрупкого разрушения их полиэтиленового слоя. Предварительный анализ показал, что вероятной причиной разрушения является сочетание ряда факторов: напряжения, вызванные температурным перепадом, высокий уровень технологических напряжений, особенности физико-механических свойств и возможные структурные изменения полиэтилена при низких температурах.

Целью исследований являлось определение особенностей морфологии структуры и механических характеристики полиэтилена, объясняющих факты хрупкого разрушения.

Образцы для испытаний вырезались из полиэтиленового слоя различных труб, в том числе из промысловых трубопроводов, где были обнаружены хрупкие трещины. В процессе исследований проведены испытания на растяжение образцов при различных температурах от +20 °С до –120 °С. Получены экспериментальные оценки остаточных напряжений в полиэтиленовых трубах. Проведены физико-химические исследования структуры полиэтилена (ИК Фурье, УФ – спектроскопия, термомеханический анализ, дифференциально-сканирующая калориметрия и рентгеноструктурный анализ). Термомеханический анализ показал существенную анизотропию коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) и анизотропную усадку полиэтилена.

Результаты проведенных исследований показывают, что рассматриваемый полиэтилен обладает большой деформационной способностью при одноосном растяжении в области низких температур. Данная характеристика полиэтилена практически не зависит от параметров технологического процесса получения труб и структурных особенностей. Наиболее важным фактором, снижающим его деформационную способность и вызывающим хрупкое разрушение полиэтиленового слоя бипластмассовых труб при их охлаждении, является наличие в данном слое сложного напряженного состояния. Проведен расчет напряженно-деформированного состояния полиэтиленового слоя бипластмассовых труб при температурном перепаде (+20° С ÷ –60° С) при различных условиях закрепления. Предложена схема испытаний плоских образцов, вырезанных из полиэтиленовых труб, на двухосное растяжение с дополнительным ударным воздействием.

Локализованные конвективные структуры в вязкой жидкости

С.Н. Аристов, Д.В. Князев (Пермь)

Конвективные фронты широко распространены в природе и отчётливо фиксируются в ряде технических процессов. Известные математические модели фронтов получены либо в рамках модели идеальной жидкости, либо с помощью различных асимптотических подходов. В данном докладе мы рассматриваем структуру конвективного фронта, используя класс точных решений уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска. Приводится точное аналитическое решение для частного случая, когда число Прандтля равно единице. С помощью численного анализа показано, что существует широкий набор структур различного типа, скорость распространения которых определяется величиной стратификации и числом Прандтля. Обсуждается возможность описания (в рамках указанного класса точных решений) влияния химических реакций и параметров жидкости на структуру фронта.

Работа поддержана совместной программой CNRS-РФФИ (грант PICS № 1170/РФФИ № 01-01-22005 НЦНИ-а) и РФФИ (грант № 01-01-00446), а также грантом РЕ-009-0 Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР).

Новая формулировка уравнений Навье-Стокса для несжимаемых жидкостей в переменных «функция тока – силовое поле», ориентированная на задачи течения со смешанными граничными условиями

С.Н. Аристов, О.И. Скульский (Пермь)

Уравнения Навье-Стокса являются основой описания явлений, происходящих в жидкой среде. В связи с тем, что эти уравнения для несжимаемых жидкостей не линейны и не принадлежат к типу уравнений Коши-Ковалевской, известные точные решения немногочисленны, а применение численных методов вызывает ряд трудноразрешимых проблем. Численные методы решения полных уравнений Навье-Стокса в естественных переменных «вектор скорости – давление» приводит к нелинейным плохо обусловленным системам алгебраических уравнений, что вызывает численную осцилляцию решения при использовании прямых методов и ограничивает использование итерационных методов их решения. Исключение давления из числа независимых переменных с помощью введения функции тока и завихренности решает проблему обусловленности алгебраических систем, но вызывает новые трудности в восстановлении поля давления и удовлетворении граничным условиям для завихренности.

Суть новой формулировки уравнений Навье-Стокса состоит в введении некоторого силового поля, дивергенция которого равна давлению. В результате математических преобразований уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости принимают вид двух замкнутых связанных между собой уравнений Пуассона (векторных в трехмерном случае или скалярных в двухмерном случае) для функции тока и силового поля. Конвективные члены уравнений Навье-Стокса преобразуются в квадратичные члены, содержащие первые производные от функции тока. Численное решение полученных уравнений может осуществляться методом сеток или методом конечных элементов. Восстановление компонент вектора скорости осуществляется дифференцированием функции тока, а давление – силового поля.

Такая постановка, в отличие от постановки в переменных «функция тока – завихренность», позволяет получить точное аналитическое решение задачи Пуазейля последовательным прямым интегрированием двух исходных дифференциальных уравнений. Для двумерных и трехмерных задач требуется разработка алгоритмов итерационного процесса по нелинейности и способов задания граничных условий для введенного силового поля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-01-96485 и № 01-01-00446).

О развитии трещины при водородном охрупчивании

Е.А. Архангельская, В.В. Лепов (Якутск)

В общем случае подходы к изучению развития трещины, в основном, базируются на основе методов механики разрушения и включают в себя установление связи между прилагаемыми к телу нагрузками, свойствами материала и параметрами трещины (геометрии и размеры), соответствующими началу разрушения в смысле разделения тела на части. Вместе с тем, при водородном охрупчивании разрушение материала в смысле разделения его на части по механизму развития трещин – заключительный этап, которому предшествует многомасштабное, многостадийное развитие трещины, кинетика которого связана с взаимообусловленным процессом накопления водорода и “разрыхления” с образованием разрывов в субмикро-, микро- и мезообъемах материала в очаге разрушения [1].

По результатам проведенных исследований с использованием туннельной микроскопии показано [2], что изменение механических свойств металлов под действием водорода связано с зарождением, развитием и накоплением различного рода дефектов структурного строения, способствующих хрупкому разрушению, и проявляющихся в основном на субмикро-, микро- и мезоскопическом структурном уровнях при деформировании материала. Для описания данного процесса - взаимообусловленного процесса накопления различного рода повреждений, вносимых действующими напряжениями и водородом, - нам представляется возможным использовать теорию накопления повреждений, предложенную Качановым Л.М. и Работновым Ю.Н [3,4].

Введен скалярный структурный параметр повреждаемости ψ, кинетическое уравнение которого учитывает уровень напряжений и концентрацию водорода в локальной области. Построена модель, основанная на связном решении задачи упругопластичности, диффузии водорода, его частичного удержания в ловушках и накопления поврежденности материала. В рамках предлагаемой модели можно описать все стадии разрушения: инкубационный период, когда происходит накопление различного рода повреждений, вносимых действующими напряжениями и водородом в микрообъеме; скачкообразный рост трещины, контролируемый критическим уровнем дефектности $\psi=1$.

1. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды. //Физическая мезомеханика.- №4.- 2001. – С.81- 87.

2. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Эволюция поля поврежденности при водородном охрупчивании. //Тр. I Евраз. Симп. по проблемам прочности материалов в условиях холодного климата, Якутск, 2002. – С.64-67.

3. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974.- 312с.

4. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. – М: Наука, 1987. – 80 с

Исследование процессов сложного нагружения методами прямого моделирования поведения поликристалла на мезоуровне

В.Н. Ашихмин (Пермь)

Методы прямого моделирования упругопластического поведения на мезоуровне находят все большее применение для исследования различных поликристаллических материалов. В данной работе исследовались особенности поведения модельного поликристалла при сложном нагружении. Задача моделирования рассматривалась в двумерной постановке. В качестве материала зерна использовался плоский гексагональный кристалл. Ориентация кристаллографических осей материала зерен принималась случайной, подчиненной равномерному распределению. Численная реализация модели осуществлялась с использованием метода конечных элементов.

В работе рассмотрены особенности деформирования представительного объема поликристалла при сложном нагружении. Исследовано влияние упругопластических свойств материала зерна на макроскопический предел текучести и упрочнение поликристалла, на вид диаграммы нагружения, предложен эстафетный механизм деформирования поликристалла на мезоуровне. Показано, что в процессе упругопластического деформирования в поликристалле на мезоуровне вследствие неоднородности упругопластических свойств образуется жесткий каркас. В процессе нагружения несущие возможности каркаса могут быть исчерпаны, что приводит к разрушению старого и формированию нового каркаса. На диаграмме нагружения подобные смены каркаса приводят к появлению участков с различным модулем упрочнения.

Отдельно в работе исследованы форма поверхности текучести и ее изменение в процессе нагружения. Рассматриваются вопросы, связанные с эволюцией поверхности текучести и с особенностями эффекта Баушингера в зависимости от истории и вида нагружения.

Сравнительный анализ композиционной и цельнометаллической пильных шин

В.Д. Ашманов, В.А. Ощепков, Л.Н. Ясницкий (Пермь)

В лесозаготовительной промышленности широко применяются бензомоторные пилы, режущим инструментом которых является пильная цепь, движущаяся по полотну пильной шины. Различают два типа полотен пильных шин: цельнометаллические и композиционные (сварные), состоящие из трех скрепленных между собой пластин. Технология изготовления сварных шин является менее трудоемкой, однако их область применения ограничена вспомогательными деревообрабатывающими операциями, не связанными с возникновением больших поперечных усилий. Для выполнения более сложных лесозаготовительных операций, таких как профессиональная валка леса, используются исключительно цельнометаллические шины, поскольку считается, что они обладают большей прочностью.

Однако легко заметить, что данная ситуация находится в противоречии с общей теорией и практикой применения композиционных материалов. Известно, что композиционные (многослойные) конструкции, как правило, имеют более высокие эксплуатационные качества, чем однослойные. Это значит, что сварные многослойные шины по своим прочностным характеристикам не должны уступать цельнометаллическим.

В настоящей работе методом компьютерного моделирования исследована причина указанного противоречия. Установлено, что серийно выпускаемые многослойные сварные пильные шины имеют неоптимальное конструктивное исполнение. На основе данных компьютерного моделирования были предложены варианты более рационального размещения сварных точек, а также другие мероприятия, способствующие выравниванию распределения напряжений по полотну пильной шины.

Испытания на изгиб и кручение опытных образцов сварных пильных шин, выполненных согласно предложенным рекомендациям, подтвердили результаты компьютерного моделирования. Новые композиционные пильные шины по своим прочностным характеристикам оказались не хуже цельнометаллических. Таким образом, проведенные исследования позволили объяснить противоречие между теорией композиционных материалов и существующей практикой применения пильных шин, а у предприятий, выпускающих мотопилы для профессиональной валки леса, появилась перспектива отказаться от цельнометаллических пильных шин и заменить их более дешевыми и простыми в изготовлении сварными композиционными конструкциями, выполненными согласно разработанным рекомендациям.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант № 01-01-01049).

Разработка программного обеспечения для численного моделирования процессов деформирования и разрушения твердых тел

Н.А. Бабайлов, В.Л. Колмогоров, А.Ю. Плотников, Л.Ф. Спевак, В.Б. Трухин (Екатеринбург)

В настоящее время актуальной является оценка прочности и долговечности деталей машин и элементов конструкций, подверженных динамическим нагрузкам. В то же время необходимо исследовать термомеханические характеристики не только во время эксплуатации, но и в процессе изготовления металлических изделий. В частности, большой интерес вызывает расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) и поврежденности материалов при обработке металлов давлением.

Представляемая работа посвящена разработке программ для моделирования процессов ОМД в динамической постановке на основе метода конечных элементов. Расчет НДС производится с помощью метода разделения переменных, основанного на вариационной постановке [1, 2]. Этот метод предполагает интегрирование по пространственным переменным. Решение вариационной задачи методом Ритца сводит решение исходной задачи к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно параметров, зависящих от времени. Параллельно с решением этой системы решается кинетическое уравнение поврежденности. Таким образом, определяется НДС до момента потери сплошности. Расчет поврежденности и определение момента возникновения и координат макродефекта ведется в соответствии с теорией разрушения [3]. Поврежденность материала в каждой точке тела в момент времени определяется по найденным напряжениям и деформациям. Предложенная методика позволяет моделировать процессы деформирования на конечном промежутке времени с учетом накопления в металле поврежденности и разрушения деформируемых тел. При разработке алгоритмов использован эйлерово-лагранжевый подход.

В ИМАШ УрО РАН имеется опыт построения моделей, описывающих некоторые конкретные процессы динамического деформирования. Разрабатываемая программа позволяет распространить предложенный подход на широкий класс процессов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01-01-00581).

1. Колмогоров В.Л. Метод расчета напряженно-деформированного состояния в общей краевой задаче развитого течения // Вестник ПГТУ. Механика. 1995. N 2. С. 87–98.

2. V.L.Kolmogorov, V.P.Fedotov, L.F.Spevak. A mathematical model for the formation and development of defects in metal //Studies in Applied Mechanics, N45. Elsevier, 1997, pp. 51-60.

3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2001. 836 с.

Оценка усталости порошковых структурно - неоднородных материалов при многоосном циклическом деформировании

А.В. Бабушкин, А.А. Чекалкин (Пермь)

Многие элементы реальных конструкций и деталей машин подвергаются многоосному деформированию, и материал, как правило, находится в условиях сложного напряженного состояния. В общем случае нагружение происходит циклически. Однако экспериментальное определение характеристик конструкционных материалов, а тем более композитов, в условиях, приближенных к реальным, весьма ограничено. В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования многоосной усталости образцов порошкового структурно - неоднородного материала. Материал представляет собой зернистый пористый макроизотропный композит на основе технически чистого железа ПЖР 3.200.28. В работе использовались осесимметричные образцы с центральной галтелью. Испытания проведены на специальной машине-качалке. Захваты машины обеспечивают возможность закрепления образца под любым углом к оси вращения шпинделя. При этом в крайних положениях приспособления образец нагружается либо только изгибом, либо только кручением. А в промежуточных положениях – изгибом и кручением совместно. В зависимости от угла расположения образца относительно оси вращения шпинделя доли изгибной деформации и деформации кручения пропорционально меняются. В работе приведены данные испытаний порошкового железа при величине угла расположения образцов относительно оси шпинделя активного захвата в 30°. Схема проведения эксперимента предполагает построение кривых Велера в диапазоне долговечности от 10^4 до 10^7 циклов нагружения, определяя, таким образом, пределы многоцикловой усталости. При этом партия образцов разбивалась на группы по 5-10 штук, в пределах группы образцы испытывались при близких значениях амплитуды колебаний. Для построения кривых Велера проводился анализ напряженно - деформированного состояния каждого образца в зоне разрушения. Для анализа НДС в зоне разрушения образцов был разработан конечноэлементный алгоритм. Расчет проведен для вторых инвариантов тензоров напряжений и деформаций, возникающих в зоне разрушения образцов. Также, согласно принципу суперпозиции, многоосное нагружение было разделено на составляющие изгиба и кручения, и проведен расчет НДС отдельных компонент многоосного нагружения. Это дало возможность сопоставлять результаты физических и расчетных экспериментов, проведенных ранее при “чистых” изгибе и кручении образцов порошкового железа, с результатами данного эксперимента. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ-Урал № 02-01-96403).

Моделирование упруго-пластической деформации на мезоуровне с учетом независимых поворотов

Р.А. Бакеев, П.В. Макаров, И.Ю. Смолин (Томск)

При описании поведения материала на мезоуровне в явном виде учитывают структуру материала. В дополнение к обычным макроскопическим параметрам в математическую модель необходимо ввести ряд параметров, характеризующих ориентацию плоскостей скольжения, развитие дефектов и т.д., в явном виде ввести элементы структуры (зерна, границы, включения). Следует учесть, что учет реальных систем скольжения очень трудоемок и требует решения трехмерной задачи.

В основе нашей модели лежит тот факт, что отдельные фрагменты структуры поликристаллических металлов испытывают недостаток активных систем скольжений, связанный с взаимодействием потоков на границах, что, в свою очередь, приводит к повороту фрагмента. Предложенная модель имитирует поведение отдельных монокристаллов с одной или несколькими базовыми системами скольжения, что приводит к ограничению возможного формоизменения и несимметрии тензора напряжений. При появлении пластического течения в любой точке мезообъема возможно развитие несимметричной составляющей тензора напряжений, которая обусловлена наличием преимущественной системы скольжения и недостатком аккомодации в сопряженных системах, что приводит к накоплению нескомпенсированного поворота и изгибов-кручений. По представленной модели проведены расчеты деформации мезообъема поликристаллического алюминия при различных видах нагрузки в двумерной постановке. Проведен анализ полученных результатов и выявлена связь между распределением независимых поворотов и локализацией пластической деформации.

Моделирование упруго-пластического поведения трехмерной структуры в условиях динамического нагружения

Р.Р. Балохонов, П.В. Макаров , В.А. Романова (Томск), Е. Coppa, З. Шмаудер (Штуттгарт)

С точки зрения современной механики и физики твердого тела внутренняя структура материала оказывает существенное влияние на его упруго-пластическое поведение под нагрузкой. В ряде работ по численному моделированию в двумерной постановке введение внутренней структуры в явном виде позволило описать ряд экспериментально наблюдаемых явлений, таких как локализация пластической деформации, фрагментация материала, сдвиг и поворот отдельных фрагментов и др. Вместе с тем структура реальных материалов является трехмерной и, хотя интуиция подсказывает, что результаты 2D моделирования могут быть обобщены на трехмерный случай, требуются дополнительные расчеты, чтобы подтвердить или опровергнуть это утверждение.

Для того, чтобы ввести в рассмотрение внутреннюю неоднородность в трехмерном случае, в работе предложена специальная процедура генерации 3D структуры различного типа. Проведены тестовые расчеты поведения поликристаллической и керамической структур в условиях динамического нагружения. Результаты трехмерных расчетов анализируются и сравниваются с двумерными аналогами.

Моделирование деформации и разрушения стальных образцов с FeB покрытиями

Р.Р. Балохонов, П.В. Макаров, С.В. Панин, В.А. Романова (Томск), З. Шмаудер (Штуттгарт)

В работе проведено исследование напряженно-деформированного состояния мезообъема среды в стальном образце при растяжении. Образец был поверхностно упрочнен методом диффузионного борирования. Данная технология позволяет наносить высокопрочные покрытия, имеющие «зубчатую» границу раздела с материалом подложки. В зависимости от режима нанесения покрытия, а также от типа стальной основы геометрия границы раздела «промежуточный материал – подложка» может существенно отличаться.

Моделирование проводилось в постановке плоского деформированного состояния. Задача решалась в рамках подхода Лагранжа. Для расчета девиатора напряжений в стальной подложке использовалась модель упруго-пластического тела с упрочнением, а при описании хрупкого разрушения боридного покрытия учтен процесс образования трещин.

Результаты расчета позволили сделать следующие выводы:

- области наибольшей концентрации напряжений располагаются вблизи основания «зубьев» боридного покрытия, откуда в дальнейшем начинают формироваться трещины в покрытии и полосы локализованной пластической деформации в стальной основе;

- граница раздела «промежуточный слой – подложка» играет основополагающую роль в процессах локализации и разрушении всей композиции.

Динамическое поведение меди при высокоскоростной деформации на стержне Гопкинсона

В.А. Баранников, Е.А. Николаева (Пермь)

Разрезной стержень Гопкинсона – современное экспериментальное оборудование для изучения поведения материала при высоких скоростях деформации. Метод использует свойства распада разрыва волны, проходящей через стержни, и основан на точном решении волнового уравнения, что обеспечивает высокую точность результатов эксперимента. Обычный разрезной стержень Гопкинсона состоит из двух длинных стержней (входного и выходного), между которыми располагается образец в форме диска, ударника, газовой пушки и регистрирующей аппаратуры. При ударе снаряд передает импульс упругого сжимающего напряжения во входной стержень. Часть его проходит в образец, а часть отражается, вследствие разницы в площадях сечений и механических свойств стержня и образца. Тензодатчики, находящиеся посредине входного и выходного стержней, позволяют измерить прошедший импульс (напряжение) и отраженный импульс (скорость деформации) в образце. Точная форма прошедшего и отраженного импульсов определяется величиной площади сечения и механическими характеристиками материала образца. По данным импульсов деформации, зарегистрированным тензометрическими датчиками на стержнях, строятся диаграммы $\sigma - \varepsilon$ для материала при различных скоростях деформации.

В работе был использован «Метод убегающего стержня», в котором выходной стержень более короткий, чем входной. В то время как отраженная волна растяжения во входном стержне достигает образца, выходной стержень «убегает» от последнего, что позволяет в этот момент удалить образец, обеспечивая однократное нагружение материала и делая возможным установить микроструктурные изменения, связанные с историей нагружения. В работе исследовано поведение меди при скоростях деформации порядка 500 – 3500 $с^{-1}$. Каждый образец испытывал однократное нагружение и быстро перемещался в калориметр, посредством которого измерялась его накопленная температура, связанная преимущественно с эволюцией дефектной подсистемы. Затем образец снова подвергался однократному нагружению и т. д. (до пяти раз). От нагружения к нагружению исследовалось изменение микроструктуры материала на трехмерном профилометре New View 5000. С этой целью использовались образцы-спутники, которые деформировались при той же скорости деформации и той же истории деформирования, что и основные образцы. Построены деформационные кривые и проанализирован энергетический баланс процесса деформирования.

Экспериментальное и теоретическое изучение релаксационных механизмов в жидкостях при ударно – волновом нагружении

В.А. Баранников, Е.В. Михайлов, Д.О. Наймарк (Пермь)

“Структурированная” реакция простых жидкостей отмечается в экспериментах Сахарова, Дерягина и др. как проявление упругости жидкостей при близких значениях скоростей деформации. Следуя предположению Френкеля о возможной качественной аналогии механизмов течения жидкостей и твердых тел, высказывается предположение о влиянии дефектов мезоскопического типа (микросдвигов) на механизмы переноса импульса в жидкостях при высоких скоростях деформации и существовании универсальных (автомодельных) зависимостей напряжения от скорости деформации, аналогичных наблюдаемым в ударно-нагруженных твердых телах. В литературе не встречается теоретического обоснования полученных результатов и, таким образом, вопрос о механизмах течения и диссипации энергии в жидкостях при высоких скоростях деформации остается открытым. Предложена теоретическая модель, объясняющая существование универсальной асимптотики вязкости (по данным Сахарова) при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} \to 10^5\ c^{-1}$, коллективными эффектами в ансамблях микросдвигов (неравновесным ориентационным переходом). Для экспериментального изучения релаксационных свойств жидкостей при волновом нагружении была создана экспериментальная установка, позволяющая путем электрического взрыва проводника в жидкости инициировать ударную волну цилиндрической симметрии и непосредственно измерять давление, температуру и массовую скорость в произвольной точке исследуемой жидкости.

Картины локализации макродеформации в монокристаллах чистых металлов

С.А. Баранникова, К.В. Гончиков, В.И. Данилов (Томск)

Проведенные ранее исследования [1] в лаборатории физики прочности (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН) по изучению локализации макродеформации в легированных ГЦК монокристаллах, а также ряде поликристаллических ГЦК материалов позволили установить, что характер локализации макродеформации зависит от закона деформационного упрочнения, и каждой стадии деформационного упрочнения соответствует своя картина локализации макродеформации.

Однако подобные данные относительно чистых монокристаллов [2] до недавнего времени отсутствовали. К тому же подобных работ для ГПУ монокристаллов вообще не проводилось. Данная работа посвящена этому вопросу.

В качестве объектов исследования была выбрана ГЦК структура на примере монокристаллов меди и никеля, ориентированных для легкого скольжения, и ГПУ структура на примере монокристаллического цинка, ориентированного для базисного скольжения.

Основным результатом работы является установление картин локализации макродеформации для Cu и Ni на стадиях легкого скольжения и линейного упрочнеия. Определение характера локализации макродеформации для Zn проводилось для стадии базисного скольжения.

Установлено, что наблюдаемые картины локализации макродеформации для чистых ГЦК монокристаллов Cu и Ni согласуются с уже известными данными. Также по результам работы можно сделать вывод о том, что легкое скольжение и площадка текучести с точки зрения макролокализации пластической деформации не всегда аналогичны. Предположительно причиной тому может служить величина коэффициента деформационного упрочнения.

Эволюция распределений локальных деформаций при базисном скольжении монокристаллов ГПУ Zn оказалась еще более сложной.

1. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Гончиков К.В., Зыков И.Ю. О новом типе волн пластической деформации в твердых телах //Изв. Вузов. Физика, 2001, т.44. №2. стр. 46-53

2. В.И. Данилов, С.А. Баранникова, К.В. Гончиков, Л.Б. Зуев Картины локализации пластической деформации в монокристаллах Cu и Ni //Кристаллография, 4, 2002, стр. 730-736.

Исследования «сплошных течений» нанодисперсных порошков

С.П. Бардаханов, В.В. Ларичкин (Новосибирск)

Работа относится к разделу современной науки о строении вещества, условно называемому “Нанотехнологии”. Ключевым моментом является рассмотрение свойств веществ, состоящих из частиц с размерами менее 100 нанометров, в частности, нанодисперсных порошков. С другой стороны, авторами данной работы предложено рассматривать такие порошки как новый тип сплошной среды.

В работе получены экспериментальные данные о течении нанодисперсных порошков для различных классических задач механики жидкости и газа. В качестве рабочих сред использовались нанодисперсные порошки с удельной поверхностью от 40 до 380 $м^2/г$ и с размерами первичных частиц от 7 нанометров и более. Впервые был использован термоанемометрический метод измерений [1].

В частности, в установках с вертикальной рабочей частью круглого сечения [2] (варьировались диаметр и длина трубы, в которой порошок двигался как «сплошная масса») проведены измерения распределения средней скорости по сечению трубы и показано наличие пограничного слоя. При движении нанопорошка флуктуации скорости могут достигать нескольких десятков процентов от средней скорости в ядре потока, которая в данной работе достигала одного метра в секунду.

В результате проведенных исследований [3] показана принципиальная возможность изучения течений нанодисперсных порошков в рамках представления их в виде нового типа сплошной среды, к рассмотрению которого могут быть применены подходы механики жидкости и газа.

1. Бардаханов С.П., Козлов С.А. Термоанемометрические измерения в течениях нанодисперсных порошков. Тез. Докл. VIII Международной конференции "Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей", Новосибирск, 2001, стр. 16-17.

2. S.P.Bardakhanov, M.E.Djuraeva, S.W.Joo, Y.U.Han, O.Y.Korkina, V.V.Larichkin, D.Y.Lee and Y.H.Lim, Rheology of ultrafine powders, In: Proc. of Int. Symp. between Sister Universities in Mechanical Engineering (JSSUME 2002), August 22-24, 2002, Kyongju, South Korea, Yuengnam University Press, 2002, pp. 209-212.

3. S.P.Bardakhanov, Flow of media with high nanoparticles' concentration, In: Abs. of International Symposium "Sedimentation and Sediment Transport", September 1-6, 2002, Monte Verita, Ascona, Switherland, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, pp. 13-14.

Волочение прутка в режиме высокоскоростного гидродинамического трения

М.Е. Басин, М.Г. Бояршинов, Г.Л. Колмогоров (Пермь)

Для снижения трения протягиваемой заготовки о стенки волочильного канала применяются предварительная обработка поверхности (травление, анодирование, окисление, нанесение различных покрытий), применение смазок и создание условий, обеспечивающих возникновение жидкостного трения вместо сухого. Возникновение жидкостного трения зависит от вязкости смазки, условий ее ввода в деформационную зону, а также от скорости волочения, формы волочильного канала и средней температуры деформационной зоны.

Для гарантированного ввода смазки между прутком и волочильным инструментом необходимо, чтобы она подавалась под давлением, превышающим нормальное напряжение в зоне контакта. В традиционном процессе волочения смазка вводится в деформационную зону за счет сцепления с протягиваемым металлом. Метод гидродинамического ввода смазки заключается в создании в ней повышенного давления за счет возникновения гидродинамического эффекта при трении смазки о движущийся пруток.

Высокоскоростное волочение предполагает применение жидких смазок, обеспечивающих эффективное охлаждение металла. Однако при этом возможны периодические выхлопы смазки. В таких случаях пруток выходит из волоки в форме, напоминающей "бамбук": участки гладкой поверхности чередуются с вытянутыми шейками. При выхлопах смазки происходит чередование режимов сухого и жидкостного трения, что приводит к значительным колебаниям усилия волочения.

В работе рассматривается задача высокоскоростного гидродинамического волочения. Принимаются следующие допущения: рассматриваемый процесс является нестационарным, осесимметричным, неизотермическим; волока принимается упругой, однородной, изотропной; смазка полагается вязкой, несжимаемой; материал прутка считается однородным, изотропным, его поведение описывается теорией неизотермического пластического течения с линейным анизотропным упрочнением.

Для реализации численного алгоритма применяется метод Галеркина с конечноэлементной аппроксимацией решения.

Результаты исследования тестовых задач термоупругости, термопластичности и течения вязкой несжимаемой жидкости свидетельствуют о малых отклонениях между численным и аналитическим решениями.

Наномеханика усиления: основные принципы

Ю.П. Басс, Ю.А. Гамлицкий (Москва)

Механические свойства резин, наполненных активными наночастицами, характеризуются двумя основными признаками: 1) прочностные характеристики наполненных резин (статическая и усталостная прочность, износостойкость, сопротивление раздиру и проч.) существенно выше аналогичных характеристик ненаполненных резин; 2) понятие равновесной упругости для наполненных резин практически не применимо, что проявляется в т.н. эффекте размягчения Маллинза.

Известно, что вблизи поверхности наночастицы наполнителя образуется слой каучуковой матрицы, находящейся в псевдостеклообразном состоянии. Наличие этого слоя является центральным местом для интерпретации свойств резины.

Мы исходим из того, что основной причиной повышения прочности является равномерное натяжение цепей каучуковой матрицы. В вулканизационной сетке каучука без наполнителя распределение цепей по натяжениям широкое. Вследствие этого вначале рвутся сильно натянутые цепи.

В композите при деформировании возникает явление “вытягивания” натянутых цепей из псевдостеклообразного пограничного слоя. Это явление аналогично явлению вынужденной эластичности, которое реализуется при температуре ниже температуры стеклования каучука и выше его температуры хрупкости. В результате натянутые цепи не рвутся, а держат нагрузку, вытягиваясь из псевдостеклообразного слоя по мере увеличения нагрузки. Обратное же возвращение в псевдостеклообразное состояние практически не реализуется по той же причине, по которой не сокращается резина, растянутая в состоянии вынужденной эластичности. Поэтому эффективная степень наполнения, включающая собственно частицы наполнителя и слой жесткого каучука, уменьшается за счет “вытягивания” сегментов макромолекул из псевдостеклообразного состояния в высокоэластическое, в котором находится каучуковая матрица вдали от поверхности активного наполнителя. Это и является причиной “размягчения” резины на втором и последующих циклах деформирования.

Указанные основные принципы можно описать математически и получить количественные механические характеристики наполненной резины.

Применение обобщенных реологических моделей в задачах релаксации остаточных напряжений в поверхностно - упрочненном слое элементов конструкций

Е.В. Башкинова, В.П. Радченко, М.Н. Саушкин (Самара)

Разработана методика расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое изделий на основе обобщенной модели элементов конструкций в пределах первых двух стадий ползучести.

Предполагается, что поверхностный слой достаточно тонкий и не влияет на жесткость всей конструкции. То есть, упрочненный слой играет роль тонкой "пленки", наклеенной на поверхность элемента конструкции и деформирующейся вместе с ним под действием внешних нагрузок. В силу этой гипотезы основная задача разбивается на три самостоятельные: восстановление начального НДС в упрочненном слое по одной из экспериментально замеренной компоненте тензора остаточных напряжений по толщине слоя после процедуры ППД; расчет НДС всей конструкции при ползучести без учета поверхностного слоя; расчет кинетики релаксации остаточных напряжений в поверхностном слое в режиме "жесткого" нагружения при заданных значениях компонент тензора деформаций, которые определяются из решения второй краевой задачи.

Таким образом, для решения задачи о релаксации остаточных напряжений необходимо иметь информацию о тензоре деформаций конструкции лишь в точках поверхности. Получение этой информации численным решением соответствующих краевых задач для элементов конструкций методом конечных элементов и методом сеток связано с преодолением существенных трудностей дискретизации, учета фактора времени и необходимостью хранения информации о НДС по всей конструкции во времени. Очевидно, что в этом плане более предпочтительным является построение приближенных аналитических решений, поскольку при наличии последних достаточно в этих решениях использовать лишь координаты точек на границы области (поверхности). Для построения приближенного решения обобщенной модели для напряжений использован подход Качанова, базирующийся на использовании двух стационарных решений: в упрочненной области и на стадии установившейся ползучести. Решены задачи релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое толстостенных сферы и трубы. Было проведено сравнение данных, полученных с использованием обобщенной модели, с данными, полученными в результате решения этих задач численными методами. Показано, что величины остаточных напряжений в процессе ползучести трубы и сферы, рассчитанные по обеим методикам, дают близкие результаты. Однако трудоемкость и время расчета при использовании приближенных аналитических решений на порядок меньше, чем при использовании классических сеточных методов для оценки НДС.

Итерационные методы определения напряженного состояния при усадке сферических включений в шаровых областях

Вяч.В. Башуров, В.В. Стружанов (Екатеринбург)

Ряд технологических операций изготовления композитных материалов предполагает усадку включений (наполнителя). Эта усадка может быть столь велика, что растягивающие деформации включений достигают величин, при которых материал из-за возникновения множественных дефектов переходит на неустойчивую закритическую стадию деформирования (стадию разупрочнения). При макроскопическом описании поведения материала на этой стадии постулат устойчивости Друккера не выполняется.

Появление областей физически неустойчивого материала может привести к тому, что положение всей композиции станет неустойчивым, и при бесконечно малом возмущении она внезапно перейдет в ближайшее устойчивое положение равновесия. В результате включения могут разрушиться.

Для определения качественных закономерностей таких явлений рассмотрена модельная задача об усадке шарового включения, окруженного упругой толстостенной сферой. Сначала были введены три основных качественных модели материала, повреждающегося под действием объемного напряженно-деформированного состояния. Эти модели отличаются друг от друга параметрами разгрузки. Записано скалярное выражение для характеристики поврежденности материала, в котором поврежденность связана с выполаживанием модуля разгрузки. Затем для каждой модели были разработаны специальные итерационные процедуры определения напряженно-деформированного состояния системы, которые применимы и в том случае, когда материал включения уже находится на стадии разупрочнения.

Сходящийся итерационный процесс расчета образующихся при усадке полей самоуравновешенных напряжений определяет устойчивое положение равновесия композиции. Но с возрастанием усадки процесс может с какого-то момента и расходиться. Для установления связи этого явления с физическим состоянием тела была исследована устойчивость положений равновесия композиции при различной усадке методами теории катастроф. Установлено, что начало расходимости каждого итерационного процесса совпадает с моментом потери устойчивости равновесия всей композиции.

Учет собственных частот колебаний при конструировании токарных резцов

В.Н. Бедрицкий (Тула)

Рассматривается задача о свободных пространственных колебаниях токарного резца. В процессе построения математической модели инструмент (токарный резец) представляется как консольно закрепленная балка (стержень), имеющая постоянное сечение и постоянную жесткость. Начало системы координат совпадает с точкой приложения силы резания. Моменты инерции поперечного сечения записаны с учетом выбранной системы координат.

Для последующего решения приняты следующие соглашения:

- отклонения отдельных точек оси стержня при поперечных колебаниях происходят перпендикулярно к прямолинейному, недеформированному его направлению;

- отклонения точек оси стержня при поперечных колебаниях происходят в двух плоскостях и являются малыми отклонениями, т.е. возникающие при этом восстанавливающие силы остаются в пределах пропорциональности;

- при крутильных колебаниях углы поворота также являются малыми.

На основании принятых предположений свободные колебания стержня описываются системой дифференциальных уравнений. Для решения данной задачи был применен метод конечных элементов [1].

Рассмотрено несколько вариантов конструкций токарных резцов. Вычислены значения первых трех частот колебаний с применением существующих инженерных формул для тех же начальных и геометрических соотношений. Сравнены результаты полученных расчетов частот свободных колебаний с инженерным расчетом. При помощи метода наименьших квадратов получены уточненные значения частот свободных колебаний для этих конструкций.

Приводятся сравнительные графики зависимостей уточненных частот от геометрии конструкции. Делаются обобщения на некоторые другие конструкции резцов, например, для резцов с металлической и неметаллической державками [2].

1. Толоконников Л.А. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Высшая школа, 1979. – 318с.

2. Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием: Сб. науч. трудов. – Тула: ТулПИ, 1989. – 132 с.// Л.А. Васин, С.А. Васин, С.А. Эккерт (ТулПИ) Постоянная и динамическая составляющие силы резания при точении резцами с бетонной и стальной державками. С.72-79.

Численное моделирование диффузии в нанодисперсных системах

А.А. Белкин (Новосибирск)

Сегодня уже очевидно, что для изучения диффузии наночастиц в конденсированных средах необходима информация микроскопического характера об их движении и взаимодействии со средой. Актуальность этой проблемы вызвана растущим применением фуллеренов, наночастиц в наукоемких производствах. В то же время традиционные теории оказываются некорректными для описания столь малых объектов. Так в экспериментах обнаружено, что коэффициенты диффузии крупных молекул и фуллеренов в жидких растворителях существенно превышают значения, предсказываемые законом Стокса-Эйнштейна [1]. Незаменимым инструментом получения упомянутой выше информации становится прямое численное моделирование.

Целью настоящей работы являлось исследование физических явлений, вызывающих второй экспоненциальный участок релаксации скорости наночастиц, впервые обнаруженный в численных расчетах [2,3]. В работе изучается взаимодействие наночастицы и микрофлуктуаций несущей среды. Использовался метод молекулярной динамики для модели твердых гладких сфер в ячейке с периодическими граничными условиями. Расчетами в равновесных и неравновесных системах подтверждено, что затухание скорости наночастицы на больших временах определяется флуктуациями, которая она сама ранее порождает при движении. Обнаружено, что пространственно-временные корреляционные функции скорости наночастицы и молекул окружения могут иметь один или два максимума. Первый из них связан с распространением звуковой волны в среде. Второй максимум для массивных частиц больше первого и по величине, и по временной протяженности, его причиной являются многократные столкновения. Исследованные эффекты значительно влияют на поведение автокорреляционной функции скорости, а следовательно и на коэффициент диффузии наночастицы. В расчетах было обнаружено, что коэффициент диффузии может на 30—50% превышать значения, предсказываемые известными теориями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-15-96164, № 01-01-00045, № 02-01-06333).

1. Kato T., Kikuchi K., Achiba Y. // J. Phys. Chem. 1993. Vol. 97. No. 40. P. 10251-10253.

2. Рудяк В.Я., Харламов Г.В., Белкин А.А. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 13. С. 29-36.

3. Рудяк В.Я., Харламов Г.В., Белкин А.А. // ТВТ. 2001. Т. 31. No. 2. С. 283-291.

Остаточные напряжения и деформации в прутковых металлоизделиях

Н.Г. Белоусова, Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова (Пермь)

При изготовлении металлоизделий методами пластического деформирования формируются остаточные напряжения, которые носят упругий характер. Потенциальная энергия упругих остаточных напряжений равна

$$U = \frac{1}{2}\int_V \sigma_{ij}\ \varepsilon_{ij}\ dV, \qquad (1)$$

где σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно, V – объем металлоизделия.

Потенциальная энергия (1) составляет определенную долю энергии пластического деформирования

$$U = \psi\ U_d, \qquad (2)$$

при этом ψ - параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений.

Решение краевой задачи теории упругости для остаточных напряжений позволяет определить потенциальную энергию упругих остаточных напряжений, значения напряжений при этом рассчитываются с помощью соотношения (2).

Для осесимметричных изделий осевые остаточные напряжения зависят от радиальной координаты и являются постоянными в окружном направлении. Однако в случае нарушения симметрии деформирования (нарушение симметрии приложения усилия, изгиб изделий при намотке на барабан, асимметрия условий трения в зоне деформации) возможно формирование асимметричных остаточных напряжений. Нарушение симметрии распределения остаточных напряжений приводит к появлению результирующего изгибающего момента и соответственно остаточных изгибных деформаций. Изделие при этом теряет прямолинейную форму и требует дополнительной правки.

Предложена методика учета асимметрии остаточных напряжений, определяются составляющие тензора остаточных асимметричных напряжений.

О возможности применения дейтерида бериллия в качестве материала оболочки лазерных рентгеновских мишеней

С.А. Бельков, Г.В. Долголева, Г.Г. Кочемасов, Е.И. Митрофанов (Саров)

Проведено исследование работы мишени на зажигание в условиях, соответствующих установке NIF (National Ignition Facility). В качестве материала оболочки мишени рассматривался дейтерид бериллия BeD_2 с небольшой примесью меди. Выбраны параметры оболочки и профилирование рентгеновского импульса, облучающего мишень, которые обеспечивают зажигание DT топлива. Показано, что при оптимальном выборе параметров мишени полное термоядерное энерговыделение мишени составляет ~19 МДж, что примерно соответствует термоядерному энерговыделению мишени с оболочкой из бериллия.

Топологические солитоны в слое жидкого кристалла конечной толщины

А. Беляев, Л.Т. Ижбердина, А.Н. Чувыров (Уфа)

Решена задача о существовании солитоноподобного дефекта в нематических жидких кристаллах (НЖК) в трехмерной геометрии при наличии цилиндрической симметрии. Показано, что несингулярные решения уравнения равновесия, для которых объемная упругая энергия конечна, являются тривиальными. Стабилизации солитонов может способствовать какое-либо дополнительное взаимодействие, например, с ограничивающей поверхностью при слабых граничных условиях. С математической точки зрения это означает учет поверхностной энергии НЖК, приводящей к возможности существования решений уравнения равновесия в виде солитоноподобных дефектов. В этой ситуации возникают автомодальные решения, которые представляют собой статические солитон и антисолитон уравнения синус-Гордона. Одновременно проведено численное моделирование распределения директора в трехмерном слое НЖК. Уравнение состояния директора при различных условиях решалось простым итерационным методом. Проведены экспериментальные изучения солитоноподобных дефектов в НЖК. Слабые граничные условия достигались путем введения в них полимерных добавок. Отличие солитоноподобных дефектов от дисклинаций хорошо фиксируются в поляризованном свете: вблизи них ветви погасания при вращении поляризатора расположены над поверхностью НЖК.

Особенности расчета течений жидкости со свободной поверхностью в переменных “функция тока – вихрь”

И.К. Березин (Пермь)

Численное моделирование задач течения вязких жидкостей при наличии свободных границ в переменных “скорость – давление” не вызывает больших трудностей для удовлетворения граничных условий на этих границах. Условия состоят в равенстве нулю тангенциальных напряжений и равенства нормального напряжения прикладываемому внешнему давлению. Использование переменных “функция тока – вихрь” освобождает нас от использования давления. Однако в этом случае на свободной границе условие по нормальному напряжению все равно требует его вычисления. Предлагается рассчитывать давление, интегрируя соответствующее уравнение движения.

В работе представлены результаты численного расчета течения вязкоупругой жидкости интегрального типа на выходе из конического канала (“разбухание” струи жидкости). Алгоритм основан на отображении неизвестной области течения на каноническую с помощью соответствующего преобразования координат. Это преобразование содержит функцию, описывающую геометрическую форму свободной границы струи. Полученное соответствующее дифференциальное уравнение второго порядка для этой функции решалось численно вдоль линии границы. Даны картины распределения скоростей, касательных и нормальных напряжений и конфигурация свободной поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-УРАЛ № 01-01-96471).

Каландрование полимерных растворов как задача механики насыщенных пористых сред

Д.А. Березинский, А.В. Костерин (Казань)

Рассматривается задача о движении пленки полимерного раствора в зазоре между вращающимися цилиндрами. Система “полимер + раствор” трактуется как насыщенная пористая среда. Полимерная сетка играет роль пористой матрицы и описывается реологической моделью Олдройда, а растворитель играет роль насыщающей жидкости. Его движение относительно полимера подчиняется закону Дарси. Рабочая часть зазора считается узкой и длинной. При этом деформации полимера можно считать поперечными, а фильтрацию растворителя – продольной. Короткая переходная область, где движение свободной пленки перестраивается в указанное течение в зазоре, моделируется линией сопряжения. Точка выхода пленки из зазора находится в ходе решения задачи из условия адгезионной прочности контакта полимера с цилиндрами.

Получено аналитическое решение стационарной задачи. Поставлена и решена также задача о реакции процесса на изменение входной толщины пленки. Найдена зависимость возмущения распорного усилия от частоты изменения этой толщины.

Моделирование пластических микродеформаций в поликристалле

С.А. Берестова (Екатеринбург)

Развитие математической теории пластичности не останавливается на изучении поведения макрообъемов с усредненными механическими свойствами, а все более приближается к моделированию их поведения с использованием данных о микроструктуре. Имеется целый ряд структурных факторов, которые существенным образом влияют на распределение пластических микродеформаций в поликристаллическом материале. В настоящее время невозможно учесть все эти факторы в полном объеме. Тем не менее, для отдельных задач только некоторые из них являются определяющими и должны быть учтены в первую очередь. Таким образом, можно создать теорию, которая, характеризуясь достаточной степенью точности, будет в то же время физически справедливой и математически доступной.

В качестве модели однофазного поликристалла рассмотрена неоднородная на мезоуровне среда с ячейками полиэдрической формы. Каждой ячейке приписаны одинаковые упругие характеристики кристалла кубической симметрии, при этом ориентация кристаллографических осей в каждой ячейке считается случайной. В модели квазиизотропного поликристалла их распределение в пространстве равновероятно. Кристаллографическая текстура, т.е. преимущественная ориентация кристаллографических осей, задается параметрами деформационной анизотропии, характеризующими распределение осей в поликристалле. Количество независимых параметров деформационной анизотропии зависит от макро- и микросимметрии материала. Достаточно точную количественную информацию, необходимую для определения параметров деформационной анизотропии, дают современные методы текстурного анализа.

В работе рассмотрена эквивалентная (совпадают параметры деформационной анизотропии материалов) квазиизотропному поликристаллу пространственная модель материала, состоящего из семи идеальных ориентировок, взятых в определенных объемных концентрациях. С использованием понятия собственных упругих состояний, являющихся ортонормированным базисом в шестимерном пространстве симметричных тензоров напряжений и деформаций, и методов линейной алгебры, предложен аналитический подход к определению порядка активизации систем скольжения в поликристалле.

Опираясь на формальное математическое представление тензорных характеристик в рамках феноменологической теории, такая модель позволяет делать качественные оценки процессов развития пластической микродеформации в квазиизотропном поликристалле.

Визуализация динамики микромеханических гироскопов

Е.Е. Бессчастнова, И.А. Комарова, В.М. Мусалимов (С. Петербург)

Исследуется динамика кремниевых микромеханических гироскопов. Среди сложных современных приборов этим гироскопам принадлежит особое место: они миниатюрны; изготовлены из монокристаллического кремния, который обладает замечательными механическими свойствами; технология изготовления конструкции гироскопа (травление - температурная обработка - нарезка) неизбежно приводят к конструктивной нелинейности; вместо традиционного маховика используется электростатическое возбуждение изгибно-крутительных колебаний упругих (кремниевых) подвесов.

Уравнения движения гироскопа, таким образом, строятся с учетом существенного вклада упруго-нелиненых составляющих. Приводится система уравнений движения, которая исследуется с использованием ППП Matlab (Simulink).

Термокапиллярная неустойчивость в многослойных системах и волны

Р.В. Бирих (Пермь)

В многослойных жидких системах разрушение равновесия может быть связано с возникновением неоднородности поверхностного натяжения границы раздела слоев жидкости. Возникающее движение границы раздела генерирует движение жидкости в обоих слоях, и судьба случайного возмущения величины поверхностного натяжения определяется асимметрией в движении жидкости в прилегающих к поверхности раздела слоях. Эта асимметрия движения бывает обусловлена различием в кинематических или тепловых свойствах жидкостей, различием в толщине слоев, наличием других слоев жидкости, в которых также возбуждается движение. В серии работ последних лет [1-3] на модельных задачах было исследовано влияние разных факторов на термокапиллярную неустойчивость двухслойных систем. Определены условия возникновения монотонной и колебательной неустойчивости и получены дисперсионные законы для колебательных возмущений. В колебательных режимах конвекции можно выделить два разных квазиупругих механизма: капиллярный, при котором кинетическая энергия движения переходит в потенциальную энергию деформируемой границ раздела (капиллярные волны), и термокапиллярный, при котором в процессе движения меняется свободная энергия поверхности из-за изменения ее температуры (термокапиллярные волны). Для этих колебательных режимов имеют место разные дисперсионные законы. Дисперсионный закон для капиллярных колебаний близок к дисперсионному закону для капиллярных волн в идеальной жидкости. Темокапиллярные волны в области малых волновых чисел не обладают дисперсией (частота нейтральных колебаний перестает зависеть от волнового числа). Капиллярные и темокапиллярные волны существенно отличаются по структуре движения жидкости. Показано, что в термокапиллярных волнах доминирует продольное движение вблизи границы раздела слоев жидкости, и что они возбуждаются, когда нагрев осуществляется со стороны “менее инерционного” слоя. Поддержка этих колебаний температурным полем осуществляется за счет различия в фазах движения в разных слоях жидкой системы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-01-00614).

1. Бирих Р.В., Рудаков Р.Н. Механизмы термокапиллярных колебаний в системе с границей раздела // В сб.: Вибрационные эффекты в гидродинамике. Перм. ун-т. – Пермь, 1998, с. 38-48.

2. Бирих Р.В. Бушуева С. В. Термокапиллярная неустойчивость в двухслойной системе с деформируемой границей раздела // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2001. № 3, с.13-20.

3. Бирих Р. В., Бушуева С. В., Рудаков Р.Н. Влияние вибраций на структуру термокапиллярной неустойчивости двухслойной системы.// Сб. научн. тр. “Молодежная наука Прикамья”. Перм. гос. техн. ун. Пермь: 2001, Вып. 1. С. 17-26.

Неустойчивость равновесия неизотермической бинарной смеси в двухслойной системе с деформируемой границей при наличии поперечных вибраций

Р.В. Бирих, Р.Н. Рудаков (Пермь)

Рассматривается устойчивость равновесия неизотермической системы, состоящей из двух плоских слоев несмешивающихся жидкостей с близкими свойствами в условиях невесомости. Исследуемая неустойчивость связана с возникновением неоднородности поверхностного натяжения границы раздела жидкостей из-за неоднородности температуры или концентрации растворимой в обеих жидкостях поверхностно активной компоненты или высокочастотным вибрационным воздействием.

Для случая поперечных градиентов температуры и концентрации и поперечных вибраций сформулирована задача устойчивости относительно малых возмущений двухслойной системы с деформируемой границей раздела. Для жидкостей с одинаковыми плотностями задача устойчивости может быть записана в приближении Буссинеска. Если плотности жидкостей различаются, то в условиях на деформируемой границе раздела появляется параметр, описывающий отношение скачка плотности к параметру Буссинеска.

При анализе устойчивости системы исследовался только случай асимметрии слоев по толщине. Все характеристики жидкостей считались одинаковыми. Показано, как меняется форма нейтральных кривых из-за наличия второго процесса переноса. Кроме аддитивного сдвига нейтральных кривых обнаружено появление новой моды колебательной неустойчивости. Для всех колебательных мод анализируются дисперсионные законы. Это позволяет выделить области поддержки поперечных капиллярных волн и продольных термо- и концентрационно-капиллярных волн.

Показано влияние интенсивных высокочастотных вибраций на термокапиллярную неустойчивость и неустойчивость системы с двойной диффузией. На фоне общей стабилизации равновесия относительно возмущений, которые нарушали устойчивость, наблюдалось появление новых областей монотонной и колебательной неустойчивости в области средних и коротких волн. В случае чисто термокапиллярной неустойчивости нейтральные возмущения “вибрационной” моды появляются при меньших по абсолютной величине числах Марангони.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-01-00614).

Влияние термокапиллярного эффекта Марангони на тепловое распределение в модельной среде в космических условиях

Н.Н. Бобков (Н.Новгород), Ю.П. Гупало (Москва), О.Р. Козырев, С.В. Оладышкин (Н.Новгород)

Создание модельных сред, в которых гидродинамические процессы протекают подобно процессам в жидкости, может ускорить решение таких важных технологических проблем как получение в условиях пониженной или скомпенсированной гравитации особо чистых веществ (стекла, металлы, композиты), выращивание в космосе кристаллов и создание веществ с новыми свойствами. Зависимость поверхностного натяжения от температуры, что составляет суть эффекта Марангони, создает существенное возмущение, особенно в космических условиях.

Рассматривается задача о стационарном течении в вязкой несжимаемой и невесомой жидкости в угловой области вблизи наклонной стенки, порождаемом термокапиллярными силами на ее свободной поверхности. Рассматриваемая проблема тесно связанная с задачей о “скребке”, которая впервые была исследована Дж. Тейлором [1] в предположении, что инерционные силы в жидкости пренебрежимо малы в окрестности вершины угла, и впоследствии была дополнена учетом инерции. В настоящей работе рассмотрено расширение классической модели Тейлора на случай, когда свободная поверхность жидкости подвержена действию постоянного температурного градиента, в то время как на твердой стенке поддерживается постоянная температура, что приводит к сложным термокапиллярным течениям вследствие зависимости поверхностного натяжения от температуры. Ранее, в рамках приближения ползущего течения были получены в замкнутой форме и визуализированы [2] гидродинамические поля. Настоящая работа посвящена моделированию с привлечением численных методов и визуализации тепловых полей в вязкой жидкости конечной теплопроводности для стандартного и аномального эффектов Марангони. В работе проанализировано влияние размера угла между свободной поверхностью, подверженной воздействию постоянного продольного температурного градиента, и твердой стенкой, на которой поддерживается постоянная температура, на тепловые поля в слое. Проанализировано влияние продольного градиента температуры, действующего на свободной поверхности жидкости, на распределение температуры в ней.

1. Taylor G. I. Similarity solution of hydrodynamic problems // Aeronautics and Astronautics (Durand Anniv. Vol.). Cambridge: Pergamon Press. 1960. P. 21-28.

2. Бобков Н.Н., Гупало Ю.П. Термокапиллярное течение вязкой жидкости внутри угла со свободной границей под действием сил Марангони // Известия АИН РФ. 2000. Т. 1. С. 152–165.

Профилирование композиционных маховиков

А.М. Болотов, Т.С. Кочеткова, Т.Н. Лядова (Пермь)

Перспективным направлением развития техники является создание аккумулирующих систем на базе инерционных накопителей энергии – маховиков. Основные критерии оценки эффективности маховиков – это удельная массовая и удельная объемная энергоемкость, т.е. энергия, запасаемая единицей массы и единицей объема маховика при максимально возможной скорости вращения.

В работе исследовалась возможность повышения удельной массовой энергоемкости с помощью профилирования поперечного сечения кольца, полученного методом окружной намотки ленты. С этой целью поставлена и решена задача оптимального проектирования. Форма сечения определялась с помощью непрерывных функций. Задача решалась при наличии физических и геометрических ограничений. Нахождение напряженно-деформированного состояния сведено к решению системы линейных уравнений.

Проведены расчеты, в которых в широком диапазоне варьировались физико-механические свойства кольца. Анализ полученных результатов показывает, что можно добиться существенного увеличения энергоемкости по сравнению с маховиком постоянной высоты. Также выявлены особые эффекты, которые не наблюдаются для изотропных маховиков.

Влияние температуры на предельное состояние образцов из конструкционных сталей

А.М. Большаков, А.Р. Иванов (Якутск)

Для изучения влияния температуры на предельное состояние образцов из конструкционных материалов были проведены экспериментальные работы на образцах с трещиной типа III и IV по ГОСТ 25-506 (материал 16Г2САФ). Как известно, при низких температурах происходит упрочнение материала, следовательно, материал теряет способность пластически деформироваться. Другими словами, происходит охрупчивание материала. В данной работе исследованы диаграммы разрушения образцов с трещиной типа III, IV, по ГОСТ 25.506 конструкционных сталей 16Г2САФ, 09Г2ФБ, 06Г2МБ, 18Г2ФБ при низких температурах от 153К до 293К.

Разрушение конструкций происходит в результате сочетания многих факторов, таких как природно-климатические особенности, моральный и физический износ и т.д., однако учесть в расчетных методиках оценки ресурса конструкции влияние всех факторов на несущую способность крайне сложно. В большинстве случаев причиной хрупких разрушений для упрочняющихся материалов является потеря способности пластически деформироваться, основными причинами чего являются низкие температуры, накопление поврежденности, наличие концентраторов.

В этой работе впервые была представлена предельная кривая охрупчивания образца с трещиной при низких температурах и определена зависимость характеристик вязкости разрушения K_{CJ} и характеристик раскрытия трещины при различных этапах потери способности пластически деформироваться в широком диапазоне низких температур от 153К до 293. Также предложена схема определения потери пластичности элемента конструкции

Воздействие вращающегося магнитного поля на переход к осциллирующему режиму термокапиллярной конвекции и рост кристаллов методом плавающей зоны в условиях невесомости

Н.В. Бондарева, А.И. Феонычев (Москва)

Для управления процессом переноса легирующих примесей в кристаллах полупроводниковых материалов, выращиваемых методом плавающей зоны в условиях невесомости, применение вращающегося магнитного поля может быть весьма полезным при учете всех особенностей возникающих при этом течений. Такие исследования были начаты нами в 1994 году, и первые результаты были доложены на 9-м европейском симпозиуме [1].

В настоящей работе это направление исследований было продолжено. Использованная модель конвекции, создаваемой вращающимся магнитным полем в неизотермической жидкости, проверена сравнением с экспериментами до режима развитого турбулентного течения жидкости, когда комплексный параметр Ha^2Re_ω достигает значений, равных $2\cdot10^8$. Для расчетов использовалась конечно-разностная схема повышенного (третьего) порядка точности по пространственным координатам.

В результате расчетов определены значения параметра Ha^2Re_ω, при котором вторичное течение становится неустойчивым и наступает режим сначала осциллирующей конвекции (упорядоченные колебания скорости), а затем и турбулентное течение при сложной структуре течения и большом числе частот колебаний. Этот переход определяется неустойчивостью течения вращающейся жидкости у торцевых твердых границ в экмановском пограничном слое. Граница перехода мало зависит от типа граничного условия на боковой поверхности (твердая стенка или свободная поверхность).

Показано, что при сочетании термокапиллярной конвекции с вращающимся магнитным полем граница перехода от ламинарного к осциллирующему режиму зависит от числа Марангони. При этом эта зависимость неоднозначная. Термокапиллярная конвекция приводит как к большей устойчивости вторичного течения, так и к снижению порога устойчивости. Показано также, что можно получить снижение радиальной макросегрегации примеси при выращивании кристаллов методом плавающей зоны только при оптимальном выборе параметров Ha и Re_ω.

1. Feonychev A.I., Dolgikh G.A. Effect of magnetic field on crystal growth process under action of gravity and capillary force. Ninth European Symposium “Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences”, Berlin. Germany, 2 – 4 May 1995. Abstracts. P. 246.

Численный анализ релей-тейлоровской неустойчивости на фронте волны нелинейной электронной теплопроводности

С.В. Бондаренко, Г.Г. Кочемасов (Саров)

Проведено численное исследование устойчивости абляционного течения в плазме в линейном приближении как для плоской, так и для сферической геометрии течения. Величины инкрементов неустойчивости находились как собственные числа самосогласованной граничной задачи. Показано, что дисперсионные кривые инкрементов абляционной неустойчивости могут быть представлены в форме Такабе $\Lambda = \alpha\sqrt{kg} - \beta k v_0$, где $\alpha \approx 0.8 \div 0.9$, $\beta \approx 2$ для плоской и $\beta \approx 3 \div 4$ для сферической геометрии течения. Показано, что расчетные инкременты абляционной неустойчивости плоского течения согласуются с аналитическими зависимостями, полученными в работах [1,2].

1. J. Sanz, Phys. Rev. Lett. V. 73, № 20. P. 2700 (1994).

2. Atzeni, M.L. Ciampi, A.R. Piriz et al. Inertial fusion target studies: heavy-ion target design and fast ignitor physics. (Montreal, Canada, 7-11 October 1996.

Алгоритмы распараллеливания одномерной схемы Годунова для кластерных вычислительных систем

О.С. Борщук, К.И. Михайленко (Уфа)

Нами разработаны и исследованы два параллельных алгоритма решения одномерной задачи о схлопывании газового пузырька, решаемой по методу Годунова. В основу распараллеливания алгоритмов положена идея геометрического параллелизма, которая заключается в декомпозиции исследуемой геометрической области на ряд подобластей, количество которых определяется числом вычислительных процессов. На основе обоих алгоритмов написан параллельный компьютерный код.

Исходный последовательный алгоритм является двухшаговым. На первом этапе работы алгоритма производится расчет предварительного значения на полушаге по времени. Для этого используются значения в двух соседних пространственных точках на текущем временном слое. Поэтому можно считать, что предварительные значения располагаются на полушаге по пространству. На втором этапе алгоритма на основе двух соседних предварительных значений вычисляется окончательное значение на новом временном слое.

В соответствии с представленной последовательностью расчетов могут быть записаны параллельные алгоритмы.

Первый из алгоритмов основан на стандартной схеме, когда по окончании расчета подобластей процессы обмениваются значениями своих теневых граней. Затем происходит расчет значений на новом временном слое.

Второй алгоритм предусматривает поэтапный обмен теневыми гранями. Поэтапность организуется на основе двухшаговой организации алгоритма. Так как на каждом шаге алгоритма рассматриваемая численная схема является двухточечной, предварительные значения в крайних точках соседних подобластей рассчитываются, исходя из одинаковых данных. В этой связи можно не вычислять одну из этих точек, а получить от соседнего процесса. После выполнения такой однонаправленной пересылки на втором шаге алгоритма ситуация повторяется, с той лишь разницей, что пересылку нового значения необходимо производить в противоположном направлении.

Особенно эффективной представленная поэтапная организация пересылок должна быть для кластерных вычислительных систем, поддерживающих топологию типа «кольцо». Однако и для топологии «общая шина» поэтапная рассылка должна приводить к повышению эффективности вычислительного процесса на большом числе процессов. Такой эффект должен проявляться за счет уменьшения количества одновременно передаваемых сообщений.

Численное моделирование на многопроцессорной ЭВМ газового потока вблизи высокоскоростного импульсного источника

М.Г. Бояршинов, А.В. Харченко (Пермь)

К импульсным источникам относятся реактивные ракетные двигатели, расположенные на космодромах, испытательных стендах, установках утилизации твердотопливных ракет, а также целый ряд иных кратковременно действующих промышленных установок, выбрасывающих в окружающий воздух газообразные загрязняющие вещества. Особенности подобных источников проявляются в высокой скорости истечения высокотемпературных продуктов сгорания, причем за сравнительно короткое время работы выбрасывается значительная масса жидких и газообразных веществ, твердых частиц, загрязняющих атмосферу. Зачастую выбрасываемые примеси представляют собой токсичные соединения или газы, которые образуют аэрозоли при взаимодействии с охлаждающей жидкостью (например, водой, вводимой непосредственно в струю продуктов сгорания для охлаждения газового потока) или атмосферной влагой.

Отсутствие методик прогноза последствий выброса в атмосферу загрязняющих веществ импульсными источниками и трудности, связанные с экспериментальным изучением этих последствий, свидетельствуют о необходимости разработки математической модели распространения дисперсной многокомпонентной примеси в воздушном потоке. Сложность процессов взаимодействия, переноса и рассеяния загрязняющих веществ, необходимость наиболее полного учета особенностей рельефа местности и застройки жилых и промышленных территорий приводят к необходимости решения пространственной системы уравнений состояния, баланса масс, импульсов и внутренней энергии фракций и несущей среды с соответствующими краевыми условиями. Для повышения эффективности расчетов вычислительные алгоритмы, реализующие численные методы решения краевой задачи, необходимо адаптировать для использования ЭВМ с параллельной архитектурой.

Для реализации математической модели разработан пакет программ с вычислительным ядром для удаленной ЭВМ с параллельной архитектурой, с развитым интерфейсом и инструментарием для анализа результатов. Вычислительное ядро подготовлено на языке C++ с использованием библиотеки MPI. Объект исследования - испытательный стенд для ракетных двигателей “Протон”. Расчеты проводились на ЭВМ с параллельной архитектурой МВС-1000/16 на базе ИМСС УрО РАН.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 02-07-90260).

Высокоскоростная деформация сплавов АМГ6 и АК-6

А.М. Брагов, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев (Н. Новгород)

Приводятся результаты динамических испытаний на сжатие сплавов АМг6 и АК-6 с использованием метода разрезного стержня Гопкинсона как при нормальной, так и повышенной температурах. Кроме испытаний при практически постоянных скоростях деформации выполнены эксперименты со сложной историей скорости деформации (с разгрузкой и последующей динамической догрузкой, а также с непрерывным скачкообразным изменением скорости деформации). С использованием метода прямого удара по образцу получены диаграммы деформирования при скоростях деформации ~$10^4 c^{-1}$.

Для исследованных сплавов построены зависимости напряжения пластического течения от скорости деформации. Отмечено заметное влияние температуры, скорости деформации, а также истории изменения скорости деформации на поведение сплавов АМг6 и АК-6. На основании полученных результатов определены параметры определяющих соотношений Зирелли–Армстронга и Джонсона–Кука.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант № 01-01-00556) и МНТЦ (проект № 1203).

Конвективный теплообмен при погружении литосферы в мантию Земли

А.Н. Буров, С.В. Соловьев (Хабаровск)

Исследуется конвективный теплообмен литосферной (океанической) плиты в зоне субдукции при ее погружении в мантию Земли. Рассматривается влияние угла погружения, скорости движения континентальной и океанической плит по дневной поверхности, подъемных сил, коэффициента теплового расширения, ускорения свободного падения, которое линейно зависит от глубины погружения, на теплообмен, структуру течения и глубину погружения литосферной плиты. В работе моделируется процесс погружения океанической плиты под континентальную. По мере погружения в мантию вещество литосферы плавится. Математическая модель субдукции литосферной плиты описывается уравнениями Навье-Стокса в приближении Буссинеска, энергии с учетом внутренних источников теплоты и неразрывности. Задача в переменных вихрь - функция тока – температура решалась численно, использовался метод Патанкара. В результате численного решения задачи получены поля температуры, функции тока, вихря, скорости и распределение чисел Нуссельта на верхней и нижней границах расчетной области. Исследовано влияние величины ускорения свободного падения на эти поля. Скорость движения континентальной и океанической плит изменялась от 1 до 9см/год. Расчеты выполнялись для углов поддвига литосферной плиты под континентальную $\varphi = 30°, 45°, 60°$. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. В области желоба (зона погружения литосферы) изотермы "прогибаются" книзу, под океанической и континентальной плитами образуются две конвективные ячейки, движущиеся навстречу друг другу, причем вихрь под континентальной плитой проникает в область, расположенную по другую сторону от погружаемой плиты. В случае неучета подъемных сил теплообмен на верхней границе области увеличивается под континентальной плитой и уменьшается под океанической. На нижней границе тепловой поток практически не изменяется. Неучет подъемных сил оказывает более значительное влияние на течение и теплообмен в мантии Земли, чем неучет тепловыделений в самой мантии. Для рассмотренных углов поддвига при скорости океанической плиты, равной скорости континентальной плиты и равной 1 см/год, образуются две крупномасштабные континентальная и океаническая конвективные ячейки, причем континентальная проникает в область океанической. При увеличении скорости океанической плиты континентальная конвективная ячейка становится мелкомасштабной. Неучет подъемных сил и увеличение коэффициента теплового расширения ведут к изменению теплообмена и движения в мантии Земли.

Конвективный теплообмен электропроводной жидкости в сферическом слое с учетом Джоулевой диссипации

А.Н. Буров, С.В. Соловьев (Хабаровск)

Исследуется тепловая конвекция электропроводящей жидкости в ядре Земли с учетом внутренних источников тепла и джоулевой диссипации (используется приближение Буссинеска). Сделаны оценки влияния внутренних источников тепла, джоулевой диссипации на структуру конвективного течения и поле температуры. Задача решалась в переменных вихрь - функция тока – температура. Для температуры рассматривались граничные условия первого и второго родов. Для магнитной индукции задаются граничные условия первого рода. В качестве начального условия для всех рассчитываемых полей задаются нулевые значения. Однако для поля температуры в качестве начального условия может быть задано аналитическое решение одномерного стационарного уравнения теплопроводности. Решение задачи осуществлялось методом конечных элементов (использовались билинейные элементы). Дискретный аналог дифференциальных уравнений получен с применением метода взвешивания невязок. По времени используется неявная схема. Для решения системы нелинейных уравнений используется метод итераций с нижней релаксацией. В расчетах использовалась равномерная сетка с числом узлов по радиусу 20 и по углу широты 60. Проведено сравнение результатов расчетов, полученных как для электропроводной, так и неэлектропроводной жидкостей. Учет магнитных сил приводит к изменению поля температуры. Основное изменение температуры наблюдается в области полюсов, в то время как для неэлектропроводной жидкости оно имеет место в области экватора. В слое образуются две конвективные ячейки большего масштаба, но такой же интенсивности. Направление движения жидкости в ячейках изменяется на противоположное. Учет джоулевой диссипации приводит к изменению поля температуры, направления движения жидкости в конвективных ячейках, формы вихрей и распределения чисел Нуссельта. В этом случае теплообмен интенсифицируется во всей прослойке. Дополнительный ко всем предыдущим факторам учет внутренних источников тепла приводит, в основном, к изменению поля температуры, не оказывая значительных качественных изменений на поля функции тока, вихря, чисел Нуссельта и магнитной индукции. Установлено, что для режимов, в одном из которых учитывается только джоулева диссипация, а в другом - джоулева диссипация и внутренние источники тепла - джоулева диссипация оказывает значительное влияние (как качественное, так и количественное) на конвекцию в сферическом слое. Увеличение отношения Gr/Re^2 на порядок приводит к интенсификации конвекции.

Эффект адсорбции в ячейке ферронематика

С.В. Бурылов (Днепропетровск, Украина), В.И. Задорожный, И.П. Пинкевич, В.Ю. Решетняк (Киев, Украина)

В последние годы значительно возрос интерес к ферронематикам (ФН) - нематическим жидким кристаллам (НЖК), которые наполнены магнитными частицами. Такие системы интересны как с теоретической, так и с экспериментальной точек зрения и весьма привлекательны в отношении приложений, в частности, при использовании в устройствах обработки и отбражения информации. Ключевым свойством ферронематиков, отличающим их от чистых НЖК, является их высокая магнитная восприимчивость, что позволяет управлять жидкокристаллической текстурой ФН с помощью весьма слабых (< 10 Э) магнитных полей.

В настоящей работе рассматривается влияние эффекта адсорбции и десорбции твердых магнитных частиц на макроскопические свойства ферронематика, заполняющего плоскую ячейку. Мы полагаем, что границы плоского слоя обработаны поверхностно-активным веществом, которое вызывает частичную адсорбцию феррочастиц на обкладках ячейки. Внешнее магнитное поле, вызывающее поворот феррочастиц, приводит к десорбции магнитных зерен и, таким образом, влияет не только на объемные, но и на поверхностные свойства ФН.

Для описания равновесного состояния ФН во внешнем магнитном поле с учетом эффекта адсорбции/десорбции мы модифицировали известный функционал свободной энергии, предложенный в работе [1]. В результате численного решения уравнений равновесия получены профили ориентации жидкокристаллической текстуры ФН и профили концентрации феррочастиц. Показано, что адсорбция магнитных зерен на обкладках ячейки снижает эффект сегрегации, что на практике может быть использовано для повыщения агрегативной устойчивости ферронематических суспензий.

Данная работа выполнена при поддержке INTAS (грант № 99-00312).

1. S.V. Burylov and Yu.L. Raikher, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 258, 107 (1995).

Условия повышения эффективности генерации высокоамплитудных кавитационных автоколебаний давления жидкости

С.В. Бурылов, Ю.А. Жулай (Днепропетровск, Украина)

Доклад посвящен экспериментальному исследованию высокочастотных кавитационных автоколебаний в гидросистемах с генератором колебаний давления жидкости, выполненным в виде трубки Вентури, и определению возможности повышения уровня колебаний давления. Результаты научно-исследовательских работ в области изыскания более эффективного использования высокоскоростных жидкостных струй для применения в устройствах, используемых в металлургической и горнодобывающей промышленности (устройства гидросбива окалины с горячекатаных листов стали, гидромониторы и т.д.), выполненных на Украине и за рубежом, показали, что применение пульсирующих струй более эффективно, по сравнению со стационарными.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования влияния угла раскрытия диффузора генератора и длины трубопровода за ним на уровень кавитационных автоколебаний. Проведен сопоставительный анализ полученных результатов с результатами теоретических исследований, проводимых ранее.

Для определения места захлопывания каверны, её объема и скорости движения применялась скоростная киносъемка и запись динамических и статических параметров жидкости с использованием прозрачных трубок Вентури и трубопровода. При этом установлено следующее:

- при определенных соотношениях геометрических параметров трубки Вентури в определенном диапазоне соотношения давления на выходе с генератора P_2 к входному давлению P_0, максимальное значение уровня колебаний давления жидкости на выходе превышает в 4÷6 раз значения установившегося давления на выходе в генератор;

- при постоянном давлении на входе в генератор частота и уровень колебаний зависит от соотношения давления на выходе из генератора P_2 к давлению на входе P_0, причем, с увеличением этого отношения частота колебаний увеличивается практически по линейному закону, а уровень колебаний с увеличением этого отношения увеличивается, достигая максимального значения при определенном соотношении P_2/ P_0, а затем уменьшается;

- с увеличением давления на входе частота и уровень колебаний увеличиваются, а максимальное значение двойной амплитуды смещается в сторону меньших значений отношения P_2/ P_0;

- с увеличением угла диффузора генератора частота колебаний увеличивается.

Усилия, действующие на блок высококоэрцитивных постоянных магнитов

С.В. Бурылов, В.Э. Воскобойник, В.Ф. Новиков (Днепропетровск, Украина)

Рассматриваются результаты исследований силового взаимодействия источника постоянного магнитного поля и токового контура. Источник магнитного поля представлен в виде набора высококоэрцитивных магнитов с различными геометрическими и физическими параметрами.

Общепринятый метод предусматривает определение силы после расчета конфигурации магнитного поля.

Постоянный магнит является нелинейным элементом, положение рабочей точки - на кривой размагничивания, а, следовательно, и поле его существенно зависит от внешних магнитных полей. Учет взаимодействия двух магнитов - достаточно сложный итерационный процесс. С увеличением количества магнитов, особенно если у них различные размеры, химический состав и физические параметры, трудоемкость определения величины и конфигурации поля резко возрастает.

Предлагается полуэмпирический метод расчета усилий, который не включает определение параметров магнитного поля постоянного магнита и блока в целом и заключается в том, что измеряется интегральная характеристика блока магнитов - его потокосцепление с токовым контуром. После этого производится расчёт усилий, возникающих в результате их взаимодействия.

Получены результаты исследований взаимодействия блока высококоэрцитивных постоянных магнитов с токовым контуром по предложенному полуэмпирическому методу. Установлена зависимость силы от смещения блока магнитов относительно токового контура. Проведены эксперименты, результаты которых дали хорошее совпадение с результатами теоретических исследований.

Установлено, что предложенный метод достаточно точно определяет взаимодействие блока постоянных магнитов с токовым контуром, а соответственно и с катушками, и его можно использовать при исследовании линейного электропривода с возбуждением от постоянных магнитов.

Растяжение полосы с V-образными вырезами в рамках теории плоской деформации

А.А. Буханько (Комсомольск-на-Амуре)

В рамках теории плоской деформации идеального жесткопластического тела задача о растяжении полосы с V-образными вырезами рассмотрена многими авторами [1-4]

Показано, что эти решения не являются полными решениями. Предлагается построение нового несимметричного решения. Исследуются поля деформаций в окрестности особенностей поля линий скольжения (линия разрыва поля скоростей перемещений и центр веера характеристик). Показано, что наибольшие деформации наблюдаются в окрестности центра веера характеристик, находящегося в угловой точке V-образного выреза. Исследуется неединственность решения. Критерием выбора предпочтительного решения принимается следующее – наибольшие значения деформаций должны быть минимальными.

Рассматривается задача о разрушении полосы с V-образными вырезами при растяжении. В качестве критериев разрушения принимается условие, что разрушение происходит, когда деформации достигают предельной величины. В качестве меры деформации используется тензор конечных деформаций Альманси, который в условиях плоской деформации имеет один независимый инвариант (например, E_1). Направление развития трещины определяется из условия того, что приращение работы, необходимой для растяжения полосы с разрушением, максимально.

1. Быковцев Г.И., Ивлев Д.Д. Теория пластичности. Владивосток: Дальнаука, 1998. 528 с.

2. Hill R., Lee E.H., Tupper S.J. The theory of wedge indentation of ductile materials//Proc. Roy. Soc. L., 1947. Ser. A. V. 188. 273 p.

3. Lee E.H. The theoretical analysis of metal forming problems in plane strain. – J. appl. Mech., №19, 1952. P. 97-103.

4. Richmond O. Plane strain necking of V-notched and un-notched tensile bars. J. Mech. Phys. Solids. 1969, Vol.17. P. 83-90.

Бифуркационные диаграммы, показатели Ляпунова и энтропия Колмогорова в анализе изотропного турбулентного течения

Г.П. Быстрай, С.И. Студенок (Екатеринбург)

Следуя Рейнольдсу и Тейлору [1], мгновенные значения скорости в системе уравнений Навье-Стокса (СНС) для вязкой несжимаемой жидкости были разложены на осредненные и пульсационные составляющие. Это позволило выделить из СНС пульсационную подсистему уравнений (ПСНС), содержащих только члены с пульсационными скоростями. При этом диагональные компоненты тензора кажущихся турбулентных напряжений в главных осях были отождествлены с пульсациями давления. С учетом свойств изотропного течения было получено уравнение Навье-Стокса для изотропных пульсаций скорости жидкости и известное уравнение Тейлора для турбулентной диссипации внутренней энергии в приведенном виде. При этом, в отличие от Рейнольдса, на данном этапе не проводилось усреднение пульсаций скорости по времени. Далее предполагалось, что турбулентный поток жидкости возмущается периодическими “ударами”, связанными с образованием турбулентных вихрей. Учет этих ударов, следуя Г. Шустеру [2], реализовывался путем добавления функции Дирака в правую часть динамического пульсационного уравнения и второй производной пульсаций скорости по времени в его левую часть. Далее жидкость рассматривалась в приближении модели вязко – упругой среды, что выражалось в учете запаздывания между возмущающим воздействием вихрей и формированием поля скоростей течения [3]. Интегрирование пульсационного уравнения с δ-образной правой частью на конечном временном интервале привело к двумерному четырехпараметрическому отображению, описывающему хаотическую динамику пульсаций скорости. Управляющими параметрами в полученном отображении являются: период между двумя последовательными образованиями вихрей, величина интенсивности пульсаций, число Рейнольдса и время запавздывания. Полученный детерминированный хаос является перемежающимся и удовлетворяет закону Колмогорова-Обухова. Предложенное отображение описывает также возникновение гигантских во времени флуктуаций при приближении к критической точке ($R \to R_c$). Для полученного отображения построены: бифуркационная диаграмма, один из показателей Ляпунова, а также энтропия Колмогорова, характеризующая скорость потери информации о начальных условиях для фазовой траектории.

1. Taylor G.I. Statistical theory of turbulence. Parts 1-4. Proc. Roy. Soc. London A. 1935. V. 151. P.421-478.

2. Schuster H.G. Deterministic Chaos. An introduction. Physik-Verlag, Weinheim. 1984. P. 240.

3. Гершуни Г.З. Гидродинамическая неустойчивость. Изотермические течения. СОЖ. 1997. №2. С. 99-106.

Форма струи загрязнителя от поверхностного источника в зоне аэрации

М.А. Вагин (Казань)

Рассматривается задача о боковом растекании струи жидкости, распространяющейся от поверхностного источника длительного действия к зеркалу грунтовых вод в зоне аэрации сложного строения. Такая ситуация имеет место при загрязнении грунтовых вод вследствие длительных утечек. Из практики известно, что с глубиной площадь сечения струи существенно увеличивается. Учет этого эффекта важен для оценки области загрязнения зеркала грунтовых вод.

Считается, что причиной растекания является образование линз полного насыщения на множестве локальных водоупоров (например, глинистых включений). Предполагается, что удельный объем этих линз пропорционален вертикальному потоку жидкости и определяет скорость бокового растекания. Исходя из этого, получено уравнение рассеяния вертикального импульса струи на множестве локальных водоупоров.

Поставлена нелинейная задача о струе загрязнителя от протяженного и точечного источников. Получено ее автомодельное решение.

Рассмотрен также случай зоны аэрации трещиновато-пористого строения. Движение жидкости в системе трещин подчинено упомянутому выше уравнению с учетом пропитки блоков. Учтена зависимость интенсивности пропитки от предыстории процесса. Методом интегральных преобразований получено точное решение задачи о протяженном источнике.

Параллелизация операций решения систем алгебраических уравнений методом многомерной скалярной прогонки

Д.А. Вайнер, В.Д. Корнеев, Н.М. Покрышкина, А.Ю. Слюняев, А.В. Танасейчук, А.Г. Тарнавский , Г.А. Тарнавский (Новосибирск)

Различные процедуры прогонки для решения систем алгебраических уравнений - дискретных представлений дифференциальных уравнений - являются весьма часто используемым сегментом в алгоритмах задач механики сплошной среды, в частности, в области аэродинамики и физической газовой динамики. Операции выполнения этих процедур в ряде методов интегрирования сложных нелинейных систем дифференциальных уравнений Эйлера, Навье-Стокса, Барнетта зачастую являются доминирующими (или, по крайней мере, существенными) с точки зрения затрат вычислительных ресурсов. Вследствие этого такие процедуры требуют применения специальных методов реализации, сокращающих эти затраты. Здесь можно отметить два возможных подхода. Первый является традиционным и связан с улучшением характеристик собственно алгоритмов. Второй путь, позволяющий кардинально снизить требуемое для вычислений астрономическое время, связан с применением новых компьютерных технологий – параллелизации операций прогонки, что делает возможным решение задач нового уровня, ранее недоступных по чисто техническим причинам. Однако это направление приводит к достаточно сложной аналитике организации прогонки в случаях, когда расчетная область “разрезана” на сегменты, решение в каждом из которых обеспечивает отдельный процессор, с необходимостью “сшивки” решений на границах сегментов. Практическая реализация методов распараллеливания прогонки приводит к многочисленным собственным, весьма существенным, проблемам с необходимостью их всестороннего анализа. В связи с этим следует согласиться, что гигантская производительность параллельных компьютеров с лихвой компенсируется сложностью их использования. Анализу этих проблем посвящена данная работа: рассматриваются способы сегментирования расчетной области на ряд подобластей при распараллеливании алгоритмов прогонки и методы организации параллельных вычислений, проводятся многоцелевые вычислительные эксперименты по определению эффективных способов параллелизации и особенностей их реализации на различных мультипроцессорных системах.

Модификация разрезного стержня Гопкинсона для испытания поведения материалов при комбинированном нагружении

А.В. Ванин (Н. Новгород)

Для исследования векторных свойств моделей упруго-пластических тел при динамическом деформировании большое значение имеют эксперименты по изучению распространения комбинированных волн (продольных и сдвиговых) в образцах, подверженных воздействию продольного и сдвигового импульсов деформации. Сравнение натурного и “численного” экспериментов позволяют исследовать эффективность различных моделей упруго-пластических тел при описании эффектов сложного динамического деформирования материала.

На основе разрезного стержня Гопкинсона была разработана и изготовлена установка для проведения испытаний материалов при комбинированном нагружении – предварительное статическое закручивание и динамическое сжатие. Испытания проводились в диапазоне скоростей деформации от 10^2 до $\sim 10^3$ $с^{-1}$.

С целью выделения сдвиговой составляющей волны нагружения сравнивались результаты экспериментов без предварительного закручивания и с предварительным закручиванием системы. Анализ и обработка экспериментальных данных производились с помощью специально созданного программного комплекса.

С использованием модификации метода Кольского для сложного напряженного состояния проведено исследование материала Д16Т в условиях двухосной деформации. Получены устойчивые результаты регистрации волн нагружения. Отмечено влияние степени предварительного закручивания системы на характеристики регистрируемых волн нагружения.

Неустойчивость по Ляпунову в аэроупругости

В.И. Ванько (Москва)

Рассматривается плоскопараллельное движение тяжелого аэродинамического профиля (плохо или хорошо обтекаемого), стесненного вязкоупругими связями, в воздушном потоке. Показано, что при любой скорости потока существуют положения равновесия системы, относительно которых ставится вопрос об устойчивости по Ляпунову.

Выведено достаточное условие неустойчивости [1]:

$$C_x(C_y' + C_x) + C_y(C_y - C_x') < 0 \qquad (1)$$

Здесь C_x, C_y – стационарные аэродинамические (а/д) коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы, штрихом сверху в тексте обозначаем производную по углу атаки.

Неравенство (1) является обобщением классического условия Глауэрта- Ден-Гартога, полученного при изучении движений с одной степенью свободы, (Глауэрт – авторотация [2], Ден-Гартог – галопирование [3]) как необходимое условие соответствующих движений:

$$C_y' + C_x < 0 \qquad (2)$$

Обработка многочисленных а/д экспериментов с плохообтекаемыми профилями, выполненных в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, доказывает адекватность условий (1) и (2). Для хорошообтекаемого профиля неравенство (1) является достаточным, неравенство (2) – необходимым условиями отрыва потока от профиля.

Показано, что (1) дает более широкий интервал “опасных” (в смысле неустойчивости) углов атаки, чем классическое условие. Условия неустойчивости обобщаются на систему жестко связанных профилей, что подтверждается результатом эксперимента в аэродинамической трубе.

Указаны приложения условий неустойчивости к проблеме проектирования различных конструкций, подверженных ветровым нагрузкам.

1. Ванько В.И., Соловьева Е.В. Об условиях аэродинамической неустойчивости положений равновесия профилей// ПМТФ.-1996, N5.- С. 29-34.

2. Glauert H. The rotations of aerofoil about a fixed axis// Great Britain Advisory Committee for aeronautics. Reports & Memoranda. March 1919, N595.- 9 p.

3. Den-Hartog I.P. Transmission line vibrations due to sleet// Transactions AIEE.- 1932, vol. 51.- P. 1074-1076.

Нахождение остаточных напряжений и деформаций при формировании трехслойной полусферической оболочки из стеклометаллокомпозита

О.Н. Васильева , В.В. Пикуль (Владивосток)

Стекло и стеклокерамика по показателям удельной прочности на сжатие и удельной жесткости намного превосходят такие конструкционные металлы, как сталь, алюминиевые и титановые сплавы. Однако стекломатериалы обладают низкой прочностью на растяжение, низкой контактной прочностью, очень чувствительны к концентрации напряжений и ударным нагрузкам, что практически сводит на нет их достоинства. Существенное повышение ударостойкости является ключевой проблемой на пути практического использования стекла и стеклокерамики в конструкциях ответственного назначения.

Новый способ изготовления оболочек прочного корпуса из стеклометаллокомпозита позволяет надеяться на полное решение выше указанных проблем [1]. Стекломатериал входит в состав трехслойного композита, в котором он находится в виде слоя между растянутыми обшивками из металлов. Обжатие стекломассы осуществляется за счет более интенсивного сокращения размеров металлических обшивок при остывании композита. Мера обжатия регулируется разницей в коэффициентах температурного расширения слоев композита путем специальных добавок в жидкую фазу стекломассы [2].

В нашей работе мы представляем математическую модель процесса формирования полусферической оболочки из стеклометаллокомпозита. Полусферическая оболочка состоит из наружных металлических обшивок, внутри которых размещена стекломасса. Подготовленные заранее полусферические металлические облицовки устанавливаются в форму, нагреваются до температуры, обеспечивающей надежное соединение со стекломассой, в пространство между ними заливается расплав стекломассы, после чего происходит остывание всей композиции. Поскольку потери тепла при остывании композита намного превосходят то количество теплоты, которое образуется при его деформировании, общая задача деформирования композитной оболочки является несвязной задачей и решается отдельно сначала температурная задача, а затем деформационная.

Нам требуется определить тепловой режим изготовления стеклометаллокомпозита и найти остаточные напряжения после его полного остывания. Все уравнения и условия в данной модели записываются в сферической системе координат.

1. Патент РФ № 2067060. Способ изготовления оболочки прочного корпуса подводного аппарата. Пикуль В.В.// Бюл.изобр. 1996. №27.

2. Пикуль В.В. Перспективы создания слоистого композита на основе стекломатериалов// Перспективные материалы. 1999. №1.

Системный подход к анализу динамики подъемно-мачтовых устройств

А.А. Васин (Тула)

Подъемно-мачтовые устройства (ПМУ) широко применяются в технических системах самого разного назначения: мобильные ремонтные базы, краны, подъемники и т.д. Одной из важнейших таких областей являются комплексы радиолокации, которые отличаются способностью одинаково успешно выполнять поставленные задачи в различных погодно-климатических условиях, а также в условиях повышенной запыленности и задымленности местности. Последнее в значительной мере определяет приоритеты использования систем радиолокации в оборонных целях, что существенно повышает требования к их техническим параметрам и возможностям.

Исходя из предназначения таких комплексов, максимальная дальность на которой обеспечивает приемлемо точное снятие координат объекта, является важной тактико-технической характеристикой. Конструктивно проблема увеличения дальности работы радиолокационного комплекса часто решается поднятием на определенную высоту приемо-передающей системы. С этой целью разрабатываются ПМУ самых различных конструкций и кинематических схем, представляющие собой, как правило, систему стержней, соединенных между собой неидеальными шарнирами с ограничением хода. Часть стержней выполняет функцию системы силовых устройств (гидроприводы) и имеют нелинейные упругие характеристики.

Исходя из особенностей эксплуатирования ПМУ, можно сказать, что они подвергаются воздействию ветровых нагрузок, которые принято разделять на статическую, обусловленную средней скоростью ветра, и динамическую составляющую, обусловленную турбулентностью атмосферы и стохастической интенсивностью пульсации скорости ветра. Кроме того, не стоит исключать из рассмотрения вибрационные нагрузки со стороны работающих силовых генераторов, в качестве которых, как правило, используется двигатель шасси. Имея дело с ПМУ как со сложным объектом неоднородной структуры, мы приходим к необходимости проведения довольно сложного анализа, но в связи с тем, что он имеет существенно дифференцированное строение и образован множеством объектов механики одного класса – стержнями, можно говорить о преимуществах системного подхода к моделированию подобных конструкций.

В докладе формулируется оригинальная суперэлементная модель подъемно-мачтовых устройств как системы стержней с неидеальными связями, разбираются все этапы построения модели и расчета, а также возможности ее применения для анализа кинематики ПМУ.

Определение спектра свободных колебаний упругих неоднородных прямых стержней методом начальных параметров

А.А. Васин, М.В. Васина (Тула)

Рассматривается задача о свободных пространственных колебаниях прямого неоднородного стержня. Плотность и механические свойства материала одинаковы для каждой точки, отсутствует естественная крутка стержня, а его геометрические характеристики - площадь поперечного сечения, главные центральные моменты инерции - есть заданные функции продольной координаты, которая отсчитывается от начала стержня.

Примем, что справедливы гипотеза плоских сечений и гипотеза о ненадавливании друг на друга слоев, параллельных оси стержня [1]. Ограничимся рассмотрением малых прогибов, отождествляя кривизны со вторыми производными поперечных перемещений по продольной координате. Помимо этого, пренебрежем сближением поперечных сечений и депланацией сечений при кручении.

В соответствии с принятыми предположениями состояние стержня описывается системой двенадцати линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, составленной из уравнений равновесия и геометрических соотношений. Для решения этой системы формулируется подход в рамках метода начальных параметров, реализующий процедуру аналитических последовательных приближений. Доказывается сходимость метода.

Приводятся результаты расчетов частот свободных колебаний и форм трубы переменного внутреннего радиуса и толщины стенки для некоторых вариантов граничных условий.

Дается обобщение предлагаемого метода и на другие схемы неоднородности, например, при непрерывном изменении жесткости и плотности по длине.

1. Толоконников Л.А. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Высшая школа, 1979. – 318с.

О постановке краевой задачи механики сверхпластичности

Р.А. Васин (Москва)

Сверхпластичность – способность материала при определенных температурно-скоростных условиях испытывать очень большие деформации без нарушения сплошности. Явление сверхпластичности широко используется в технике, в том числе при разработке перспективных технологий обработки металлов давлением. Грамотная формулировка соответствующих начально-краевых задач сверхпластичности является актуальной проблемой.

В докладе обсуждается важнейший принципиальный аспект этой проблемы – выбор определяющих соотношений для включения их в постановку краевой задачи. С одной стороны, определяющие соотношения должны удовлетворять известным общим требованиям и адекватно описывать поведение материала в предполагаемом диапазоне изменения параметров термомеханического взаимодействия на него; с другой стороны, следует учитывать, что математический вид определяющих соотношений может влиять на тип системы уравнений, составляющих общую постановку краевой задачи.

Приводится обзор и анализ определяющих соотношений, наиболее часто используемых в расчетах технологических процессов в режиме сверхпластичности. Отмечается, что в соответствующих публикациях далеко не всегда обосновывается адекватность используемых определяющих соотношений и практически никогда не ставится вопрос о типе и свойствах системы уравнений краевой задачи. Обсуждается специфика краевых задач сверхпластичности для двух наиболее распространенных видов определяющих соотношений – модели нелинейно-вязкой жидкости (пороговое напряжение равно нулю) и модели вязко-пластического материала (пороговое напряжение не равно нулю).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-01-00673).

Суперэлементное моделирование движений в гимнастике

С.А. Васин, Е.Д. Грязева, М.В. Грязев (Тула)

В процессе занятий гимнастикой применяются самые разнообразные и, в том числе, редко встречающиеся в жизненной и трудовой практике упражнения. Они состоят из сложных двигательных действий, которые требуют от спортсмена высокой степени технического совершенства, развития двигательных способностей. При этом возможны травмы, такие как растяжение связок, травмы менисков и межпозвоночных дисков, вывихи, переломы, сотрясение мозга и другие травмы. Чтобы своевременно предотвратить возможные травматические повреждения, необходимо всестороннее изучение движений на основе модели организма спортсмена или отдельных его элементов. Задачей моделирования является определение характеристик движения отдельных элементов организма как относительно земли, так и взаимных перемещений.

Ввиду сложности опорно-двигательного аппарата человека единственно реальной возможностью моделирования является применение метода суперэлементов, основой которого является анатомическое членение. При этом возможно применение как дискретных, основанных на традиционных конечноэлементных разбиениях моделей, так и аналитических, опирающихся на теорию стержней с пространственно-криволинейной осью. Суставы как сочленения организма моделируются как пространственные шарниры с ограничениями на взаимные перемещения и вязкоупругим сопротивлением, допускающие конечные повороты в ограниченных пределах. Прочностные характеристики суставов как предельные значения сил и моментов в суставе, вызывающие или болевые ощущения, или разрушение элементов сустава (разрывы связок и т.п.), определяются из статистического анализа спортивных травм.

Предложен способ агрегатирования моделей отдельных органов в единую модель организма, учитывающую вязкоупругие свойства составляющих его тканей. Наличие выделенной группы уравнений связей позволяет решать задачи с нелинейностью релейного типа, связанной с достижением предельных значений взаимных поворотов органов.

Алгоритм численного исследования динамического поведения стержней в насосных системах при учете сжимаемости жидкости и податливости подвески насоса

И.Н. Вассерман (Пермь)

Одним из актуальных и интенсивно развивающихся направлений в вычислительной механике является исследование систем, подвергающихся действию нагрузок, для которых их зависимость от скоростей является многозначной (системы с кулоновым трением, насосные системы).

Исследованию данного класса задач посвящено большое число работ. В большинстве из них многозначный характер зависимости проявляется при нулевых значениях скорости.

Однако в реальных конструкциях может возникнуть необходимость учета таких факторов, как податливость контактирующих тел, сжимаемость жидкости в цилиндре насоса, податливость подвески насоса, и т.д. В этом случае вышеупомянутые скорости уже не будут нулевыми.

Использование сглаживающих функций вместо ступенчатой зависимости в данном случае проблему не решает, поскольку режиму прилипания здесь соответствует смена типа зависимости нагрузки от кинематических величин. Если при скольжении сила зависит от скорости точки, то при прилипании – от перемещения.

Рассмотрен вопрос об обобщении вариационной формулировки на случай "несовершенных" нелинейностей, для которых режиму прилипания соответствует не нулевое, а некоторое обратимое упругое перемещение. Алгоритм численного расчета был адаптирован для вышеупомянутых систем.

Был рассмотрен тестовый пример для исследуемой системы (одномассовая система, эквивалентная системе, полученной дискретизацией стержня при числе элементов, равном единице). Показано, что режим работы при наличии податливости жидкости является более мягким.

Полученный алгоритм был применен для исследования динамического поведения стержневых систем, являющихся упрощенными моделями штанговых колонн насосных установок при учете сжимаемости жидкости в цилиндре насоса и податливости подвески насоса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96484).

Использование структурно-феноменологической модели ползучести для прогнозирования процессов ползучести и релаксации различных материалов

И.И. Ведерникова (Саров), А.В. Коновалов (Екатеринбург), А.И. Коршунов, Л.В. Поляков (Саров)

Несущая способность многих конструкций определяется реологическими свойствами - ползучестью и релаксацией, входящих в них конструкционных элементов, т.е. способностью сохранять этими элементами в течение гарантийного срока свои деформативные и силовые характеристики. Поэтому, естественно, задача прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкции на времена, значительно превышающие имеющиеся данные экспериментов на ползучесть и релаксацию напряжений, является актуальной и практически важной.

Авторами ранее построена структурно - феноменологическая нелинейная модель ползучести релаксирующих композиционных и полимерных материалов при одноосном сжатии [1]. Модель описывает стадии неустановившейся и установившейся ползучести и предназначена для оценки работоспособности конструкций в области сжимающих напряжений и прогноза ползучести и релаксации напряжений при длительном сроке эксплуатации изделий. При построении модели для стадии установившейся ползучести приняли некоторую зависимость скорости деформации ползучести от напряжения. Превышение скорости ползучести на первой стадии над скоростью установившейся ползучести учли добавкой.

В данной работе показано использование построенной структурно-феноменологической модели ползучести для прогнозирования процессов релаксации и ползучести по экспериментальным данным на релаксацию и ползучесть пенопласта ПС-1, Фторопласта-4 и Полиэтилена Низкой Плотности [2].

Показано, что приведенная структурно-феноменологическая модель ползучести позволяет прогнозировать процессы ползучести и релаксации на времена, значительно большие (на один – два порядка) времени их экспериментального определения. При этом отличие прогноза от прямых экспериментальных данных составляет для Полиэтилена Низкой Плотности и Фторопласта-4 ~2-3%, для пенопласта ПС-1 ~10-15%.

1. Ведерникова И.И., А.И.Коршунов, Л.В.Поляков. Построение модели процессов релаксации и ползучести методами идентификации. Новые промышленные технологии. Выпуск 1 (300), 2001г.

2. Уржумцев Ю.С. Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига, Зинатие, 1975.

Распространение плоских волн в упругом полупространстве при произвольно заданных начальных условиях и граничных условиях второго рода

Н.А. Веклич (Москва)

Получено аналитическое решение плоской линейной задачи динамической теории упругости для полупространства. Уравнения движения решались при произвольно заданных начальных распределениях перемещений и скоростей. На границе полупространства задавались нормальное и касательное напряжения, также произвольно распределенные. Применялся метод интегральных преобразований и интегрирование на комплексной плоскости, по аналогии с [1]. Окончательные расчетные формулы для перемещений и других характеристик напряженно-деформированного состояния полупространства приведены к виду интегральных сверток от известных функций, входящих в правые части начальных и граничных условий, с соответствующими ядрами, полученными при решении уравнений движения. Причем все ядра являются элементарными функциями, которые в каждый момент времени отличны от нуля только в некоторой конечной области (в волне), ограниченной фронтами. Проанализированы другие аналитические особенности ядер. В частности, рассмотрен характер разрывов ядер при подходе к фронтам и к особой точке Релея на поверхности полупространства. Проведено сравнение решения с результатами других авторов [2-7].

1. Веклич Н.А. Распространение упругих волн в прямоугольном клине при ударе гранью о плоскую неподвижную преграду//Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь 23 – 29 августа 2001 года. Аннотации докладов. С. 149.

2. Сеймов В.М. Динамические контактные задачи. Киев: Наукова думка. 1976. 283 с.

3. Филиппов И.Т., Егорычев О.А. Нестационарные колебания и дифракция волн в акустических и упругих средах. М.: Машиностроение. 1977. 304 с.

4. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука. 1981. 688 с.

5. Петрашень Г.И., Молотков Л.А., Крауклис П.В. Волны в слоисто-однородных изотропных упругих средах. Л.: Наука. 1985. 302 с.

6. Поручиков В.Б. Методы динамической теории упругости. М.: Наука. 1986. 328 с.

7. Исраилов М.Ш. Динамическая теория упругости и дифракция волн. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1992. 204 с.

Количественные характеристики инвариантных свойств нерегулярных гидродинамических структур на основе вейвлет-анализа

И.И. Вертгейм, В.Г. Захаров (Пермь)

В сильно нелинейных режимах структуры, возникающие в гидродинамических системах, становятся квазирегулярными и нерегулярными, и для их описания необходимо введение специальных методов. Для анализа таких структур предложено использовать направленные (анизотропные) вейвлеты, такие как вейвлет Морле (Morlet) или Коши [1]. Кроме обычных параметров трансляции и дилатации (растяжения/сжатия) такие вейвлеты имеют дополнительный параметр вращения.

В нерегулярных структурах отсутствует пространственная периодичность, и полезная информация может характеризоваться только масштабной и угловой переменными. Для описания свойств инвариантности структур относительно масштабирования и вращения можно ввести так называемую масштабно-угловую меру, интегрируя вейвлет-преобразование по пространственной переменной

К сожалению, непрерывное вейвлет-преобразование не имеет быстрого алгоритма, подобного БПФ, и требует значительных вычислительных ресурсов. В связи с этим возникла необходимость разработать параллельный алгоритм, основанный на распараллеливании вычислений по масштабам.

Для выделения всех возможных симметрий относительно вращения и масштабирования использованы автокорреляционные функции [1,2], позволяющие количественно охарактеризовать свойства симметрии анализируемых структур. На основе разработанных методов анализа и введенных характеристик симметрий (в том числе скрытых и приближенных) проанализирован ряд квазирегулярных и нерегулярных структур и определены количественные меры свойств симметрии этих структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Пермской области (гранты №02-07-90305 и РФФИ–Урал № 02-01-96407).

1. Antoine J.-P., Murenzi R. Two-dimensional directional wavelet and the scale-angle representation// Signal Processing. 1996. V. 52. P. 259-281.

2. Zakharov V.G., Wertgeim I.I. Wavelet scale-angle analysis of hydrodynamic irregular patterns similar to voronoi tesselations// Proc. of the Ninth European Turbulence Conference. Advances in Turbulence IX. Castro I.P., Hancock P.E. (Eds). 2002. Barcelona.

Влияние предварительного циклического нагружения на закритическое деформирование дисперсноупрочненных металлокомпозитов на основе меди

В.Э. Вильдеман , А.Н. Горбунов (Пермь)

Исследуется стадия закритического деформирования дисперсноупрочненных волокнистых металлокомпозитов на основе порошковой меди КМ-4 и КМ-25 при квазистатических и циклических испытаниях. Дисперсноупрочненные композиционные материалы - это спеченные, содержащие искусственно вводимые высокодисперсные, равномерно распределенные частицы, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления. При этом в качестве упрочняющей фазы используют оксиды, карбиды и нитриды металлов. Высокодисперсные неметаллические включения вводят для повышения жаропрочности. В результате микросканирования материала КМ-4 можно сделать вывод о том, что основной материал в продольном направлении имеет волокнистое строение с включениями различной геометрической формы и цвета. Неметаллические включения располагаются по образующей, в центре образца их расположение - произвольное.

Для изучения влияния предварительного циклического нагружения на закритическую стадию деформирования, характеризуемую ростом деформации, сопровождающим падение напряжения, были проведены квазистатические испытания материала КМ- 4 с построением ниспадающей ветви диаграммы деформирования на разрывной машине Инстрон – 1195. Нагружение образца проводилось с периодическими разгрузками и последующими повторными нагружениями. По результатам микросканирования разрушенного образца в продольном направлении можно сделать вывод о вытягивании волокон, при этом разрушение происходит пучками. Диаграмма деформирования после предварительного усталостного нагружения с малой амплитудой сохранила ниспадающий участок, более того, возрос предел прочности и предельные значения деформации и напряжения. Качественно подобные результаты были получены и для другого дисперсноупрочненного композиционного спеченного материала на основе порошковой меди КМ–25.

В результате проведенных экспериментальных исследований для дисперсноупрочненных композиционных материалов на основе порошковой меди КМ-4 и КМ-25 обнаружен эффект повышения предела прочности в результате предварительного циклического нагружения малой амплитуды и показана возможность существенного увеличения деформационного ресурса за счет реализации закритической стадии деформирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96479).

Закономерности процессов накопления повреждений и условия перехода к локализованному разрушению зернистых композитов

В.Э. Вильдеман, А.В. Зайцев (Пермь)

Разработана двухуровневая структурно-феноменологическая модель зернистого композита со случайными прочностными и деформационными свойствами, учитывающая влияние жесткости нагружающей системы, с единых позиций описывающая неупругое квазистатическое деформирование нагруженного тела как многостадийный процесс накопления повреждений, а макроразрушение - как результат потери устойчивости этого процесса. Смена одного состояния материала другим приводит к изменению внешней нагрузки в зависимости от свойств и конструктивного устройства нагружающей системы, характеристики которой при решении краевых задач учитываются специальными нелокальными граничными условиями. Разработан способ учета этих граничных условий при численном решении краевых задач методом конечных элементов. Определены характеристики нагружающей системы для зернистых композитов случайной структуры. Проведена оценка влияния степени неоднородности прочностных свойств элементов структуры на характер закритического деформирования, показавшая связь реализации равновесных состояний материла на стадии разупрочнения с возникновением внутренней поврежденной структуры в первоначально однородном бездефектном материале вследствие локализации разрушения. На основе результатов моделирования испытаний на трехосное комбинированное пропорциональное нагружение показано, что повышение жесткости нагружающей системы способствует стабилизации процесса разрушения и увеличению предшествующих макроразрушению деформаций. Определены закономерности эволюции структурных повреждений зернистого композита и формирования условий макроразрушения: разносопротивляемость, объемное разрыхление при сжатии, вырождение ниспадающих ветвей диаграмм деформирования при совместном действии одноосной сжимающей нагрузки и бокового давления. В рамках разработанной модели обосновано существование нелокального параметра - критического значения радиуса корреляции статистических моментных функций второго порядка поврежденной структуры и второго инварианта тензора микродеформаций, определяющего начало разупрочнения вне зависимости от вида макрооднородного напряженно-деформированного состояния, а также переход от стадии дисперсного накопления повреждений к локализованному разрушению. Сформулированы новые нелокальные критерии закритической деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 01–01–96479).

Моделирование разрушения металлов в процессе вырубки

Ю.В. Виноградов (Тула)

Рассматривается подход к моделированию процессов разделения конструкций посредством внедрения в объем острия режущего инструмента.

Для описания поведения материала используется обобщение теории Ильюшина на случай конечного деформирования [1].

Описание процесса упругопластического деформирования осуществляется с использованием вариационного соотношения, построенного на основе принципа Журдена, и функциональной меры деформирования, позволяющей строить образ процесса относительно вихревого базиса.

Особенностью данной модели является сочетание математической модели конечного упругопластического деформирования со специализированной процедурой решения на основе метода конечных элементов.

С целью описания процесса разделения выделяется слой элементов, соответствующий предполагаемой границе разделения материала, для которого разработана процедура изменения геометрии связанности элементов конструкции по границе раздела. Для оценки момента нарушения сплошности материала используются различные критерии разрушения.

На примере задачи внедрения абсолютно жесткого клина в упругопластический материал демонстрируется процесс рубки. Проводятся сопоставления результатов численного моделирование процессов рубки для различных критериев разрушения с экспериментальными данными.

1. Адамов В.И. Построение конечно-элементной модели процесса конечного упругопластического деформирования /Тульский политехнический институт. - Тула, 1986. - 11с. - Деп. в ВИНИТИ 27.08.86, № 6195-8.

Исследование пластичности материала при ступенчатом изменении напряженного состояния

Д.И. Вичужанин, С.В. Смирнов (Екатеринбург)

Во многих процессах обработки металлов давлением напряженное состояние материала в точке в процессе деформирования меняет свой знак на противоположный. Например, в начале процесса штамповки на свободной боковой поверхности заготовки преобладают растягивающие напряжения, а после касания боковой поверхностью гравюры штампа будут преобладать сжимающие напряжения. В процессе ступенчатого изменения напряженного состояния возможны как накопление поврежденности деформируемого материала [1], так и процессы залечивания поврежденности. Таким образом, возможно увеличение или уменьшение предельной деформации, которую способен выдержать металл до момента разрушения [2,3]. Исследования ступенчатого изменения напряженного состояния при двухстадийной деформации описаны в работах [1,3]. Напряженное состояние при этом изменялось путем регулирования давления жидкости в контейнере, в котором происходят испытания. Несмотря на то, что в литературе имеется описание как самих экспериментов, так и их результатов, они до сих пор являются уникальными, так как техника высоких давлений является весьма сложной в эксплуатации. Целью данной работы являлась разработка методики и образцов для испытаний в условиях ступенчатого изменения напряженного состояния при использовании серийных испытательных машин. Ступенчатое изменение напряженного состояния осуществлялось за счет специально подобранной формы образцов. Проведено математическое конечно-элементное моделирование процесса деформирования и определено напряженно-деформированное состояние образцов с помощью пакета программ QFORM. Показана возможность изменения напряженного состояния образца до пяти раз по схеме: "растяжение - сжатие - растяжение - сжатие - растяжение" в процессе испытания образца на осадку. Предложена методика обработки результатов испытаний пластичности металла при ступенчатом изменении напряженного состояния. Результаты испытаний могут быть использованы для сравнительных исследований пластичности металлов в условиях ступенчатого изменения напряженного состояния, а также для идентификации моделей разрушения.

1. Пластичность и разрушение /под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977, 336 с.

2. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984, 144 с.

3. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях /Береснев Б.И., Мартынов Е.Д., Радионов К.П. и др. М.: Наука, 1970, 160 с.

Оценка напряжённо-деформированного состояния изделий при наличии подвижной зоны контакта

А.А. Вишняков, Н.М. Кочнева, С.В. Ямалитдинова (Пермь)

Развитие ракетной техники зачастую приводит к созданию изделий, не скреплённых или частично скреплённых с корпусом. К их числу относятся противоградовые ракеты, отработка которых требует решения проблем достижения экологической чистоты, высокой эксплуатационной надёжности и т.д. Стремление сообщить ракете высокие лётные качества и одновременно обеспечить необходимую эффективность налагает ряд особых требований к конструкции. Наиболее простым решением являются варианты изделия вкладного бесканального, скреплённого по переднему торцу, или сочетание первого с частично скреплённым канальным блоком.

Прочностная отработка таких изделий связана с решением контактной задачи теории упругости численными методами. В МКЭ контактное взаимодействие реализуется через совмещающиеся узлы элементов, расположенных на границе контактирующих тел [1,2]. Для участков предполагаемого контакта проверяются граничные условия, сформулированные в форме нестрогих неравенств для нормальных напряжений и перемещений. В задаче с учётом трения условия для касательных напряжений записываются в виде: $|\sigma_\tau| \leq - \mu\sigma_n$, что позволяет учесть два возможных состояния для точек границы, находящихся в контакте: полное сцепление (неравенство) и проскальзывание (равенство). С учётом граничных условий, налагаемых на перемещения и узловые силы, для каждой пары узлов предполагаемой зоны контакта взаимодействующих тел минимизация потенциальной энергии в виде принципа Геррманна приводит к системе линейных уравнений. При реализации алгоритма решения контактной задачи для исследованных вариантов конструкции изделия (скреплённых с передней крышкой моноблока и комбинированного из двух частей) необходимая точность достигается в результате выполнения 17-20 итераций.

Использование описанного способа решения контактной задачи для анализа НДС и оценки прочностной работоспособности изделий, скреплённых по переднему торцу, в т.ч. варианта противоградовой ракеты “Алан”, позволило более точно определить уровень напряжений и деформаций и выставить или скорректировать требования к физико-механическим характеристикам материалов.

1. Химмельблау Д. // Прикладное нелинейное программирование. М.: Наука,1966.С.707.

2. Барлам Д.М. // Решение контактной задачи теории упругости методом конечных элементов // Проблемы прочности, 1983, N4.С. 39-43.

Подмодели специально сжимаемой жидкости на двумерных подалгебрах

В.Г. Волков (Уфа)

Проблемы, связанные со сжимаемой жидкостью, до сих пор являются актуальными и требуют своего решения. Следует отметить, что, например, поведение газожидкостных смесей, которые перегоняются при добыче нефти, исследование струй при гидрорезании материалов – все эти практические задачи нуждаются в детальном теоретическом исследовании и разработке адекватной математической модели. В данной работе рассмотрены двумерные подалгебры из оптимальной системы алгебры Ли L_{13}, допускаемой уравнениями газовой динамики со специальным уравнением состояния, описывающим поведение сжимаемой жидкости при больших давлениях и высоких температурах. Для них вычислены инварианты и построены инвариантные подмодели ранга 2 и 3, которые приведены к одному из канонических типов: эволюционному либо стационарному. Результаты вычислений сведены в таблицу.

Исследование влияния накопленной деформации на качество неоднородной конструкции

Д.А. Волков, И.О. Жигулев, В.Г. Шибаков (Набережные Челны)

При проектировании технологического процесса обработки металлов давлением важной задачей является выбор управляющих параметров, обеспечивающих повышение качества металла штампуемых деталей, его механические свойства.

Качество изделий во многом определяется размером зерна и структурной однородностью металла. Разнозернистость резко ухудшает свойства материалов. Границы участков между мелко- и крупнозернистыми зонами часто являются очагами образования трещин при деформировании.

Размер зерна зависит от термомеханического режима пластической обработки: температуры пластической деформации, степени накопленной деформации в металле и скорости деформации.

Таким образом: конечные деформации, накопленные в металле в процессе формообразования, должны способствовать формированию однородной структуры с минимальной разнозернистостью, а также тому, чтобы средний размер зерна соответствовал условиям эксплуатации изделия.

При формообразовании неоднородных конструкций в процессе одновременно протекающей кристаллизации и пластической деформации значение конечной степени деформации должно полностью компенсировать явления усадочного характера в затвердевающем компоненте и соответствовать значениям литейной усадки, включающей в себя объемную усадку кристаллизации и линейную усадку затвердевшего металла. Кроме того, конечная степень деформации при совместном деформировании разнородных металлов должна обеспечивать возникновение и развитие адгезионных связей. Таким образом, повышение качества получаемого материала исключением пористости и других явлений усадочного характера в затвердевающем компоненте, усиление адгезионных связей на контакте разнородных металлов являются первоочередной задачей при проектировании неоднородных конструкций, получаемых пластическим деформированием кристаллизующегося металла и армирующего элемента.

В настоящее время на кафедре МиТОМД Камского государственного политехнического института проводятся исследования процессов совместно протекающих пластической деформации и кристаллизации при формообразовании неоднородных конструкций – биметаллической полосы и объемно-армированных деталей. Результаты исследований позволят оценить влияние конечной степени деформации на качество неоднородных конструкций на стадии проектирования материалов.

Нелинейная динамика контактной границы сплошных сред с различной плотностью

Н.Б. Волков (Екатеринбург), А.Е. Майер, К.А. Талала, А.П. Яловец (Челябинск)

Путем редукции гидродинамического течения в объеме, занятом одной или двумя жидкостями с разными плотностями, к динамике свободной или контактной границы получены динамические уравнения, описывающие их эволюцию. Эти уравнения позволяют достаточно просто и экономично исследовать существенно нелинейные стадии неустойчивости свободных и контактных границ.

Показано, что сколь угодно малое возмущение свободной поверхности приводит за конечное время к формированию и отрыву капли. Соответственно, сколь угодно малое возмущение контактной границы сред с разной плотностью приводит за конечное время к формированию и последующему отрыву крупномасштабного вихря тяжелой жидкости.

Полученные теоретические результаты качественно и количественно согласуются с экспериментами, выполненными в [1,2]. Приводятся результаты исследований динамики поверхности мишени при воздействии на нее интенсивного пучка заряженных частиц.

1. Алешин А.Н., Лазарева Е.В., Зайцев С.Г. и др. // ДАН СССР. 1990, т.310, №5, с.1105.

2. Розанов В.Б., Лебо И.Г., Зайцев С.Г. и др. Препринт ФИАН. №56. М., 1990.

Эффекты взаимодействия естественной и вынужденной конвекции

П.К. Волков, А.В. Переверзев (Калуга)

Разработан алгоритм и код численного решения на основе классического применения метода конечных элементов для решения регуляризованных уравнений несжимаемой жидкости. Задача решается в исходных переменных скорость - давление путем совместного решения системы алгебраических уравнений. Построенный метод численного решения обладает качествами, присущими спектральным методам: высокой точностью, отсутствием схемной вязкости по пространственным переменным. Алгоритм прост в реализации.

Эффективность алгоритма проверена на расчетах модельных задач – международных бенчмарках: течениях жидкости в каверне под воздействием движущейся крышки [1]; течениях жидкости вследствие разности температур вертикальных стенок [2]. Результаты расчетов объективно дают лучшее согласие с экспериментами по сравнению с конечно-разностными методиками и уточняют решения других авторов во всех диапазонах изменения параметров. Обоснован выбор параметра регуляризации.

Исследованы течения жидкости, возникающие под совместным действием двух факторов: вынужденного течения от движения крышки и естественноконвективного течения от разности температур боковых стенок. Данная задача может рассматриваться как бенчмарк, и как модельная для исследования влияния внешних воздействий на конвективный теплоперенос. Получены решения для двумерных и трехмерных задач в диапазоне чисел Рэлея от 10 до 10^7. Расчеты при малых значениях числа Рэлея могут рассматриваться в качестве модельных для условий микрогравитации.

Исследован характер конвективного теплообмена при совместном действии двух указанных факторов. При движении крышки по направлению естественноконвективного течения аддитивного усиления скорости движения жидкости в объеме не происходит. Наблюдается объединение полей скорости от двух источников движения с небольшим увеличением интенсивности. Вблизи движущейся стенки реализуется течение, которое является преобладающим.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Калужской области (гранты № 00-01-96004 и № 01-01-96021).

1. Волков П.К., Переверзев А.В. Решение регуляризованных уравнений несжимаемой жидкости в переменных скорости-давление методом конечных элементов // Вычислительные технологии. 2002. Т7. С. 106-113.

2. Волков П.К., Переверзев А.В. Трехмерная свободная конвекция в заполненной воздухом кубической каверне // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т3. С. 45-48

Экспериментальное исследование диффузионной кинетики поглощения растворителей сшитыми эластомерами в условиях одноосного растяжения

Е.Р. Волкова, Е.Я. Денисюк, Р.М. Якушев (Пермь)

Работа посвящена экспериментальному исследованию неравновесных процессов набухания эластомеров в хороших растворителях при фиксированном одноосном растяжении. Если образец эластомера деформировать, а затем поместить в низкомолекулярный растворитель, то с течением времени его упругая реакция будет монотонно уменьшаться. Это явление объясняется тем, что в результате поглощения растворителя происходит значительное изменение упругих свойств материала, и в нем возникает неоднородное напряженно–деформированное состояние, которое эволюционирует во времени. Процесс релаксации упругих напряжений полностью определяется диффузионным процессом поглощения растворителя материалом. Это позволяет изучать диффузионную кинетику набухания эластомеров по экспериментальным релаксационным кривым, характеризующим изменение во времени упругой реакции деформированного и помещенного в растворитель образца. Такой подход реализован в данной работе.

Дано описание экспериментальной установки, которая позволяет определять упругую реакцию набухающего в растворителе образца в условиях одноосного растяжения при различных степенях растяжения. Предложена теоретическая модель, описывающая этот процесс. Рассмотрены методы, с помощью которых из экспериментальных релаксационных кривых можно извлекать информацию о термодинамических и транспортных свойствах материала. Представлены результаты экспериментального исследования процессов набухания полибутадиенуретанового эластомера в дибутилсебацинате при различных степенях растяжения. Показано, что процесс поглощения растворителя в данных условиях является нефиковским и хорошо описывается предложенной моделью. По экспериментальным данным произведена оценка зависимости транспортных свойств исследуемого материала от деформаций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02–03–32845).

Математическое моделирование эволюции дислокационной структуры и релаксации напряжений при фазовом α – β переходе в системе Pd - H

А.Б. Волынцев, А.Н. Шилов (Пермь)

Насыщение водородом гидридообразующих металлов, находящихся под нагрузкой, приводит к многократному (на несколько порядков) ускорению эффектов ползучести, релаксации напряжений и обратного механического последействия [1]. Интенсификация всех этих процессов связана с целым комплексом малоисследованных физических явлений. Среди них, прежде всего, называются такие явления, как ориентированные фазовые превращения, пластичность превращения – иначе говоря, размягчение материала в области перемещающейся межфазной границы и фазовый наклеп, обусловленный размерным и структурным несоответствием гидридных включений и матрицы.

В работе методом вычислительного эксперимента подробно исследуется процесс роста зародышей β - фазы, когерентно связанных с матрицей. Рассматривается влияние на процесс релаксации напряжений и эволюцию дислокационной структуры как каждого из перечисленных факторов в отдельности, так и их совместное воздействие.

Используется модель континуального распределения дислокаций с циклическими граничными условиями. Учитывается дальнодействующее упругое взаимодействие дислокаций. Анализируется режим испытаний на релаксацию напряжений ($\varepsilon = const$) при непрерывной закачке водорода. Предполагается, что зародыши новой фазы имеют эллипсоидальную форму и определенным образом ориентированы относительно направления внешней нагрузки. Для расчета микронапряжений, создаваемых включениями β - фазы, используется модель псевдодислокаций, предложенная А.Б. Волынцевым [2]. Учет пластичности превращения осуществляется моделированием на границе раздела зародыш-матрица условий, облегчающих пластическое течение.

Показано, что на процесс релаксации внешнего напряжения основное, контролирующее влияние оказывает фазовый наклеп. В ходе роста зародышей возникают мощные внутренние микронапряжения, которые в сочетании с внешним напряжением приводят к интенсивной подвижке дислокаций. Однако ориентированность зародышей и пластичность превращения оказывают существенное влияние как на величину, так и на кинетику процесса релаксации.

1. Спивак Л.В., Скрябина Н.Е., Кац М.Я. Водород и механическое последействие в металлах и сплавах. Пермь, 1993. 343 с.

2. Волынцев А.Б. Наследственная механика дислокационных ансамблей. Компьютерные модели и эксперимент. Иркутск, 1990. 288 с.

Конвективные течения газа, вызванные периодическим изменением плотности

Е.В. Вьюжанина, С.В. Русаков, Е.Н. Федоровцева (Пермь)

В докладе рассматриваются конвективные течения сжимаемого газа в области между параллельными жесткими границами, которые совершают периодические колебания конечной амплитуды в противофазе. В качестве модели используется модификация уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска, где плотность считается известной (периодической) функцией по времени. Кроме того, в уравнении энергии в виде источникового члена учитывается выделение (поглощение) тепла при сжатии (расширении).

Решаются две задачи: конвективное течение в горизонтальном и вертикальном слоях газа. Жесткие границы изотермичны и имеют одинаковую температуру. Для рассматриваемой модели получено аналитическое решение для нормальной (по отношению к границам) составляющей скорости и температуры. В вертикальном слое тангенциальная составляющая скорости определялась численно методом сеток. В результате расчетов зафиксированы достаточно сложные нестационарные структуры течения, содержащие до 3 восходящих и 2 нисходящих (или 2 восходящих и 3 нисходящих) потоков.

Проведено исследование устойчивости полученных конвективных течений к плоским нормальным возмущениям. Уравнения в частных производных, полученные относительно амплитуд возмущений, в рамках линейной теории устойчивости решались численно методом сеток. Для заданного закона колебаний границ исследовано поведение критического числа Грасгофа и соответствующего ему волнового числа в зависимости от частоты колебаний. В рассмотренном диапазоне чисел Прандтля (от 0.5 до 1.5) течения наименее устойчивы при частоте колебаний порядка 1.

Особенности временной эволюции хемо-гравитационной конвекции на сферической поверхности

А.В. Вязьмин, Д.А. Казенин, В.А. Каминский, С.П. Карлов (Москва)

Вопросы возникновения и временной эволюции конвективных структур, порождаемых и поддерживаемых химическими реакциями, явились предметом многочисленных исследований в связи с изучением формирования более интенсивных механизмов переноса вещества, по сравнению с обычной молекулярной диффузией. Явление хемо-гравитационной неустойчивости заключается в возникновении вблизи границы раздела газовой и жидкой фаз самопроизвольных конвективных течений за счет работы гравитационных сил, когда вблизи поверхности раздела протекает процесс хемосорбции, в результате которого образуется более тяжелый, чем окружающая жидкость, продукт реакции. Под действием гравитационных сил этот продукт оседает в окружающей жидкости, формируя конвективную картину, которая эволюционирует во времени. Основные закономерности возникновения и развития хемо-гравитационной неустойчивости на плоской границе раздела фаз газ-жидкость и на краевом мениске смачивания исследованы в [1, 2].

Экспериментально с помощью оптического микроскопа в режиме реального времени были исследованы особенности возникновения и эволюции хемо-гравитационной неустойчивости вблизи поверхности сферического пузырька диоксида углерода, созданного на конце иглы микрошприца и помещенного в водный раствор щелочи. Реакционный продукт образуется на поверхности пузырька в виде тонкой пленки через некоторый промежуток времени, который может составлять несколько секунд после замещения инертного газа диоксидом углерода. При этом хорошо заметны поднимающиеся вверх конвективные потоки нагретой за счет выделяющегося тепла химической реакции жидкости. Далее пленка реакционного продукта утолщается и начинает стекать вдоль поверхности пузырька книзу как отдельная «квазифаза», обладающая поверхностным натяжением. На заключительной стадии в нижней части пузырька формируются капли продукта реакции определенного размера, которые периодически отрываются от пузырька и осаждаются в окружающей жидкости, практически не смешиваясь с ней.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-16294).

1. Кутепов А.М., Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Карлов С.П., Вязьмин А.В. Экспериментальные исследования межфазного массопереноса в системе газ-жидкость оптическими методами.// Теор. основы хим. технол., 2001, Т. 35, С. 227-231.

2. Karlov S.P., Kazenin D.A., Vyazmin A.V. The time evolution of chemo-gravitational convection on a brim meniscus of wetting.// Physica A, 2002, V. 315, No. 1-4, P. 307-313.

Некоторые аспекты построения сеток конечных элементов с применением метода Делоне

С.Н. Вяткин (Пермь)

В начале восьмидесятых годов прошлого века появились первые эффективные алгоритмы построения сеток конечных элементов, основанные на триангуляции Делоне. В настоящее время метод Делоне широко применяется для генерации конечноэлементных сеток в процессе численного решения множества двумерных и трехмерных прикладных задач механики сплошных сред и в смежных областях. Однако в нем остается довольно много белых пятен, особенно при построении сеток трехмерных областей.

Исполнение условия Делоне для сетки предполагает, что сферы, описанные на вершинах элементов, являются «пустыми», то есть, внутри данных сфер нет узлов, принадлежащих другим элементам. Это требование является необходимым для построения сетки Делоне и обеспечивает выпуклость окружения каждого узла сетки для двумерной области. В трехмерном пространстве «пустота» сфер уже не всегда обеспечивает выпуклость окружения узлов конечноэлементной сетки, что приводит к возникновению множества аномалий сетки («иглы», «шапочки», «конверты» и т.д.) [1]. Получение решений частных задач механики сплошных сред на такой сетке, в принципе, возможно. Однако при решении нестационарных задач, связанных с деформацией сетки (задачи пластического деформирования, газовой динамики и массопереноса в лагранжевой постановке и т.д.), как правило, возникает вырождение аномальных элементов, вследствие чего появляется неопределенность кумулятивных свойств искомых полей в аномальных зонах.

Для борьбы с аномалиями используют различные алгоритмы оптимизации сетки, что приводит к значительному увеличению затрат времени для построения сетки. Кроме того, сама процедура оптимизации приводит к нарушению условия Делоне для всей области.

В представленной работе рассмотрены некоторые подходы, обеспечивающие исполнение условия Делоне в сетке трехмерных элементов. В частности, предложен алгоритм генерации поля внутренних узлов, обеспечивающий гарантированное отсутствие аномальных элементов. Для безусловной определенности вычислений предложено более широко использовать целочисленную арифметику.

Приведены примеры построения конечноэлементных сеток для областей сложной формы.

1. Paul-Louis George, Houman Borouchaki. Delaunay triangulation and meshing: Application to finite elements. Paris: Hermes, 1998.

Исследование влияния степени обжатия резины на изменение свойств при растяжении

Г.Я. Гавриленко, В.Г. Золотухин, В.Н. Ковров, В.В. Мошев (Пермь)

При изучении структурно-механических свойств зернистых композитов приходится сталкиваться с решением задачи о сближении двух жестких сферических частиц, расположенных в объеме упругой матрицы. Результаты расчетов [1] свидетельствуют о возникновении высоких значений сжимающих напряжений в области между полюсами частиц, но их влияние на структурную повреждаемость материала остается мало изученным. Можно предположить, что эти напряжения должны существенным образом влиять на изменение свойств наполненных материалов, что важно при оценке некоторых технологических воздействий на материалы. Цель работы заключалась в экспериментальной оценке влияния степени обжатия, в частности, при прокатке в вальцах, на свойства резины при растяжении.

Объектом исследований была выбрана техническая резина, характеризующаяся при растяжении пределом прочности 10 МПа и разрушающей деформацией около 400 %. Прокатка пластин из резины проводилась в вальцах при возрастании величины обжатия от 1,5 до 10 крат за один переход. Затем из пластин вырубали образцы в виде двухсторонних лопаток и вели растяжение при скорости деформирования 20 мм/мин с записью кривых удлинение-нагрузка.

Результаты экспериментов показали, что, начиная со степени обжатия 3,2, происходит размягчение резины, характеризуемое общим снижением сопротивления растяжению. Вместе с тем прочность резины либо остается на прежнем уровне, либо даже растет с повышением степени обжатия. Интересно, что и предельная деформация разрушения при таких воздействиях возрастает на $200 \div 250$ %, что может свидетельствовать о выравнивании структурной неоднородности материала. Исследование набухания резины после прокатки в вальцах показали, что густота вулканизационной сетки снижается при возрастании степени обжатия, что характеризует поврежденность молекулярной сетки. Ясное представление и количественные оценки структурных изменений при рассматриваемых воздействиях требуют дополнительных исследований.

1. V.V.Moshev, L.L.Kozhevnikova. Structural cell particulate elastomeric composites under extension and compression. Int. Journal of Solids and Structures 39 (2002), 449-465.

Динамика накопления выбросов отрицательной плавучести с учетом массообменных процессов с окружающей средой

Г.Р. Галиаскарова (Стерлитамак)

Представлена математическая модель распространения тяжелых выбросов в атмосфере, построенная аналогично теории мелкой воды. Данный класс задач представляет практический интерес с точки зрения оценки риска аварийных ситуаций, возникающих на различных химических предприятиях, т.к. тяжелые газы представляют наибольшую опасность для природы и человека, поскольку распространяются преимущественно вдоль поверхности земли. Силы гравитации препятствуют их активному перемешиванию с окружающим воздухом. Рассмотрены случаи плоско - и радиально - одномерной постановок задачи. В работе рассматривалось два сценария: мгновенный выброс в неподвижной атмосфере и продолжительный выброс. В случае продолжительного функционирования точечного источника смога для некоторых ситуаций в инерционном приближении найдены аналитические приближенные и автомодельные решения [1].

Для случая мгновенного выброса тяжелых газов проведено численное моделирование процесса растекания газопылевого облака с отрицательной плавучестью с учетом сопротивления наземных объектов, сопротивления со стороны земной поверхности и со стороны атмосферы. Исследовано влияние массообменных процессов на процесс растекания выбросов отрицательной плавучести.

1. Шагапов В.Ш., Галиаскарова Г.Р. К теории накопления смога в штиль.// Изв. АН Физика атмосферы и океана, 2002, №1

Эффективная вязкость суспензий в высокочастотном электромагнитном поле

А.Д. Галимбеков (Уфа)

Поведению суспензий в квазистационарных электромагнитных полях посвящено большое количество работ [1-3]. Однако данные исследования являются неполными и односторонними, так как охватывают малую часть спектра электромагнитного излучения. Представляет интерес изучение поведения суспензий в электромагнитных полях высокочастотного диапазона ($10^{4}-10^{9}$ Гц), которые, в отличие от квазистационарных полей, обладают рядом характерных особенностей. Так необходимо иметь в виду, что такие термо- и гидродинамические величины как скорость потока жидкости, плотность жидкости, температура, давление и т. д. являются более медленно изменяющимися величинами, чем изменения векторов напряженностей электрического и магнитного полей.

В работе на основе статистической механики исследуется механизм воздействия высокочастотного электромагнитного поля на разбавленную суспензию сферических частиц с постоянным дипольным моментом. Получено выражение для эффективной вязкости. Для определенности полагается, что частицы обладают электрическим дипольным моментом и, следовательно, испытывают воздействие со стороны вектора напряженности электрического поля, однако полученные результаты справедливы при соответствующей замене обозначений для суспензии частиц с магнитным диполем. Показано, что выражение для коэффициента сдвиговой вязкости разбавленной суспензии зависит от частоты, величены и направления высокочастотного электромагнитного поля. Причем, в зависимости от частоты высокочастотного электромагнитного поля происходит торможение или ускорение вращения частиц суспензии, что соответственно увеличивает или уменьшает коэффициент вязкости. Показано, что ускорение частиц суспензии высокочастотным электромагнитным полем и соответственно уменьшение коэффициента сдвиговой вязкости носит резонансный характер.

1. Шлиомис М.И. Эффективная вязкость магнитных суспензий // ЖЭТФ. - 1971, т. 61, вып. 61(12). С. 2411 - 2418.

2. Мозговой Е.Н., Блум Э.Я., Цеберс А.О. Течение ферромагнитной жидкости в магнитном поле // Магнитная гидродинамика. 1973. №1. С. 61 - 67.

3. Цеберс А.О. Течение дипольных жидкостей во внешних полях // Магнитная гидродинамика. 1974. №. 4. С. 3 - 18.

Эволюция волн давления в жидкости при наличии в ней пузырьковой зоны ограниченных размеров

М.Н. Галимзянов (Уфа)

В данной работе рассмотрена эволюция волн в жидкости, в которой находится пузырьковая завеса конечных размеров. В связи с последним обстоятельством необходимо учитывать двумерные и трехмерные эффекты.

Так же работа посвящена вопросам численного моделирования распространения волн давления в жидкости с пузырьковой зоной ограниченных размеров и различных форм. Для описания движения пузырьковой жидкости используется система уравнений приведенная в [1] с уточнением для радиальной скорости, предложенной в [2]. Эта система уравнений позволяет адекватно описывать динамику волн с достаточно "крутыми" участками, когда сжатие пузырьков определяется не только эффектами радиальной инерции несущей жидкости, но и акустической разгрузкой на пузырьках и, следовательно, сжимаемости жидкости.

Проанализирована зависимость динамики волн от амплитуды первоначального сигнала, а также от характеристик завесы.

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, Т.1, 2, 1987.

2. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К. // ДАН. 1989. Т. 304. № 5. С. 1077-1088.

Основной резонанс в полуоткрытой трубе при турбулентном режиме колебаний газа

Р.Г. Галиуллин, Л.А. Ткаченко (Казань)

Резонансные колебания в трубе, открытой с одного конца, сопровождаются образованием пульсирующей струи, турбулизацией потока, а также рядом других нелинейных эффектов [1], представляющих практический интерес благодаря их распространению в технике.

Рассмотрим резонансные колебания в трубе, на одном конце которой расположен гармонически колеблющийся поршень, а другой конец сообщается с окружающей средой в турбулентном режиме. Считаем, что турбулентность развивается со временем монотонно, достигая оси трубы спустя определенный промежуток времени после начала разгона [2, 3].

Если $M_p \ll 1,\ H \gg 1,\ \varepsilon \ll 1,\ Sh \ll 1$, $\mathrm{Re}_\omega \geq 1.6 \cdot 10^5$, где M_p - число Маха поршня, H - частотный параметр, ε - параметр нелинейности, Sh - число Струхаля, Re_ω - число Рейнольдса, поток можно считать турбулентным, и задача сводится к решению методом возмущения модифицированных уравнений пограничного слоя. Для того чтобы решить эту систему, применяем подход, основанный на линеаризации турбулентного касательного напряжение на стенке τ_w. Граничное условие на открытом конце определяем аналитически, воспользовавшись представлением о струйном характере истечения и сферическом втекании в трубу [4].

Расчет колебаний газа на фундаментальной частоте при точном резонансе показал, что зависимость безразмерной амплитуды колебаний от длины трубы близка к обратно пропорциональной и удовлетворительно описывает эксперимнтальные данные [5].

1. Галиуллин Р.Г., Халимов Г.Г. Исследование нелинейных колебаний газа в открытых трубах // Инженерно-физический журнал. 1979. Т.37. №6. С.1043-1050.

2. Галиуллин Р.Г., Тимохина Л.А., Галиуллина Э.Р., Пермяков Е.И. Модель турбулентных осциллирующих потоков в гладких трубах // Инженерно-физический журнал. 2001. Т.74. №3. С.121-124.

3. Jensen B.L., Sumer B.M., Fredsoe J.G. Turbulent oscillatory boundary layers at high Reynolds number. // J. Fluid Mech. Vol.206. 1989. P.265-297.

4. Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Пермяков Е И. Резонансные колебания газа в трубе с открытым концом со слаборазвитой турбулентностью // Инженерно-физический журнал. 1998. Т.71. №2. С.311-316.

5. Репин В.Б., Новиков Ю.Н., Дементьев А.П. Экспериментальное исследование нелинейных колебаний газа в открытой трубе // Нестационарные задачи механики. Труды семинара / Казанск. физ.-техн. ин-т. 1989. №22. С.103-110.

Кинетико-вероятностный подход к прогнозированию прочности зернистых эластомерных композитов

О.К. Гаришин, Л.А. Комар (Пермь)

На основе теоретических исследований напряженного состояния вокруг двух жестких сферических включений в упругой несжимаемой матрице установлены зависимости математического ожидания разрывного усилия от физико-механических характеристик связующего, размеров частиц и расстояния между ними, скорости приложения внешней нагрузки [1]. В результате предложен новый кинетико-вероятностный критерий возникновения локального микроповреждения в композитной структуре в виде межфазных отслоений. Он основан на совместном использовании термофлуктуационного и статистического подходов к появлению микроповреждений в структурно-неоднородных средах, что позволило учесть влияние скорости нагружения и размеров дисперсной фазы на макропрочность композита.

Композит моделировали как систему из последовательно соединенных пакетов, содержащих наборы из произвольно ориентированных стержневых элементов с реальными распределениями жесткостных и прочностных характеристик, которые получали, численно синтезируя случайные пространственные структуры из жестких сфер и производя их физическую дискретизацию [2]. Каждый стержень соответствовал континуальному элементу в виде двух жестких частиц и мягкой матричной прослойки между ними. Такой подход позволил значительно снизить объемы вычислений и, в то же время, с достаточной полнотой учесть структуру композита, которая в случае высоких наполнений является определяющим фактором в формировании его макросвойств.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента промышленности и науки администрации Пермской области (грант № 01-01-96486).

1. Комар Л.А., Гаришин О.К., Свистков А.Л. Моделирование процессов возникновения микроповреждений в зернистых эластомерных композитах с учетом размеров частиц наполнителя и скорости нагружения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2002. Т. 8, № 3. С. 358–364.

2. Гаришин О.К., Комар Л.А. Масштабный эффект прочности в дисперсно наполненных полимерных композитах // XIII Симпозиум "Проблемы шин и резинокордных композитов": Труды. Москва, 2002. Т.1 С. 92–98.

Температурные эффекты, возникающие при ударном взаимодействии пластин из функционально-градиентных материалов

А.В. Герасимов, Д.М. Шалковский (Томск)

Функционально-градиентные материалы являются смесевыми материалами, изменение концентрации компонент и, следовательно, физико-механических характеристик которых по пространственной координате происходит по определенному закону. Ранее в работах [1-2] была предложена физико-математическая модель, описывающая деформирование и разрушение функционально-градиентных пористых материалов при упругопластическом течении под действием ударных и взрывных нагрузок. Система уравнений, описывающая движение функционально-градиентных материалов, подробно изложена в [1-4]. Математическая постановка включает: уравнения неразрывности, движения, энергии, которые замыкаются соотношениями Прандтля - Рейсса при условии текучести Мизеса и уравнением состояния типа Ми-Грюнайзена. Эти соотношения дополняются кинетическим уравнением, описывающим рост и сжатие пор. Прочностные характеристики пористого материала зависят от его текущей пористости. Учитывается влияние пластических деформаций, давления и температуры на прочностные характеристики матрицы.

В представленной работе основное внимание уделяется температурным эффектам в преградах из функционально-градиентных пористых материалов, которые возникают при взаимодействии преград с высокоскоростными ударниками. Исследуется влияние характера изменения концентрации компонент, а также величины и характера изменения пористости по пространственной координате на разогрев исследуемых материалов.

1. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Численное моделирование деформирования и разрушения функционально градиентных пористых материалов при взрывном и ударном нагружении // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5, № 3. С. 94-106.

2. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Модель деформирования и разрушения многокомпонентной пористой упругопластической среды с непрерывным изменением физико-механических характеристик //Проблемы прочности. 1999. №2. С.139-150

3. Герасимов А.В., Михайлов В.Н. Влияние градиентов пористости на распространение ударных волн в преградах // Избр. докл. VI Всероссийской научно-технической конференции ”Механика летательных аппаратов и современных материалов“ Томск: Изд. ТГУ, 1999. С.151-153.

4. Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Поведение материалов с градиентными упрочняющими покрытиями при интенсивных динамических нагрузках // Перспективные материалы. 1997. №6. С. 13-18.

Механизмы пластической деформации интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$, обладающих аномальной температурной зависимостью механических свойств

М.В. Геттингер, Ю.В. Соловьева, В.А. Старенченко (Томск)

Аномальная зависимость механических свойств сплавов со сверхструктурой $L1_2$ проявляется в увеличении деформирующих напряжений с ростом температуры. Для описания этого явления в разных температурных интервалах необходимо учитывать специфические для данной группы сплавов механизмы движения и блокировки сверхдислокаций. Проявление этих механизмов зависит, в первую очередь, от состояния дальнего атомного порядка и условий испытания сплавов. Это приводит к тому, что в разных испытаниях (активная деформация, ползучесть, релаксация деформирующих напряжений, ползучесть, вариация скорости деформации) по-разному проявляются механизмы движения и блокировки сверхдислокаций. В настоящей работе проведен комплекс механических испытаний по активной деформации, релаксации деформирующих напряжений, вариации скорости деформации сплавов Ni_3Ge и Ni_3Al с $L1_2$ сверхструктурой.

В опытах по релаксации деформирующих напряжений были получены следующие результаты: 1) при температурах свыше 473К релаксация деформирующих напряжений монокристаллов Ni_3Ge описывается логарифмической зависимостью только при небольших временах релаксации (60-120 секунд); 2) для ориентации [001] монокристаллов сплава Ni_3Ge имеются три температурных интервала, различающихся по характеру изменения V^{*-1} от τ ; 3) температурная зависимость эффективного активационного объема многостадийна; 4) обнаружена аномальная температурная зависимость скорости ползучести в опытах по релаксации деформирующих напряжений.

Скоростная чувствительность этих сплавов изучалась в широком диапазоне скоростей и температур, что позволило выявить температурно-скоростные интервалы, в которых обнаруживается аномальная скоростная зависимость механических свойств (т. е. величина деформирующих напряжений уменьшалась с увеличением скорости деформации).

Полученные экспериментальные закономерности положены в основу математической модели деформационного и термического упрочнения сплавов со сверхструктурой $L1_2$. Построена единая модель, описывающая термическое упрочнение, ползучесть и релаксацию напряжений в сплавах со сверхструктурой $L1_2$. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Проводится анализ различных аспектов проявления механизмов термического упрочнения в условиях активной деформации, релаксации напряжений, вариации скорости пластической деформации.

Аналитическое решение задач термоупругости методом фиктивных канонических областей

С.Л. Гладкий (Пермь)

Многие инженерные конструкции подвержены воздействию неравномерного распределения температуры, и учет в них термоупругих напряжений является необходимой задачей. Автором предлагается алгоритм применения метода фиктивных канонических областей (ФКО) для получения аналитических решений линейных задач термоупругости.

Задачи термоупругости являются неоднородными краевыми задачами, и вектор перемещений должен удовлетворять уравнениям равновесия в пределах некоторого тела D и граничным условиям на его поверхности, которые в общем виде могут быть записаны следующим образом

$$L(U) = F(T) \qquad (1)$$

$$l_m(U)\big|_{S_m} = l_m^* \quad m = \overline{1, M} \qquad (2)$$

где U - вектор перемещений, T - температура, F, L, l_m - некоторые операторы.

Согласно методу ФКО, искомое тело мысленно погружается в пересечение канонических тел, для которых известно решение уравнения (1) в виде суммы

$$U(\bar{x}) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n u_n(\bar{x}) + \sum_{m=1}^{M} d_m u_m^t(\bar{x}) \qquad (3)$$

где c_n - постоянные коэффициенты, u_n - функции, каждая из которых удовлетворяет однородным уравнениям равновесия, u_m^t - частные решения уравнения (1), соответствующие $T = t_{m(x)}$, $t_{m(x)}$ - функции, являющиеся решением температурной задачи.

Коэффициенты c_n подбирают из условия удовлетворения граничным уравнениям. Таким образом, для решения задачи термоупругости методом ФКО необходимо получить общее решение однородных уравнений равновесия и частные решения неоднородных уравнений, соответствующие общему решению температурной задачи.

Автором получены частные решения плоских задач термоупругости в полярной и декартовой системах координат и осесимметричных задач в цилиндрической и сферической системах координат. Алгоритмы решения задач заложены в программу REGIONS (разработана автором), реализующую метод ФКО для плоских и осесимметричных краевых задач. Алгоритмы проверены на тестовых задачах. Получены решения некоторых сложных задач термоупругости.

Расчет высокоскоростного взаимодействия стального цилиндра с преградой при ударе по нормали

В.А. Глазырин, В.А. Горельский, А.А. Рогова (Томск)

Взаимодействие импульсных нагрузок на пластины сопровождается в ряде случаев характерным разрушением их лицевой поверхности (так называемый лицевой откол), однако строгий анализ этого явления отсутствует [1]. Эксперимент иллюстрирует характер лицевого разрушения пластин при динамическом контакте с компактными частицами. Разрез области разрушения в пластине толщиной 15 мм, образованного компактным телом, скорость которого составляла 0.6 скорости звука вещества пластины, свидетельствует о том, что трещины вблизи лицевой поверхности ориентированы сверху вниз от оси удара, а в нижней части пластины - снизу вверх. Это свидетельствует о зарождении откольных поверхностей еще до значительной деформации материала. В дальнейшем деформация пластины, вызываемая внедряющим телом, содействует полному отрыву откольного кольца от лицевой поверхности. Однако из анализов результатов экспериментов не удается проследить последовательность, время действия и вклад различных механизмов разрушения в наблюдаемую итоговую структуру повреждения пластины [2].

С целью выявления механизмов образования разрушений вблизи лицевой поверхности было проведено численное исследование процессов нестационарного взаимодействия твердых тел в широком диапазоне начальных условий. Исследуется осесимметричная задача о взаимодействии деформируемого цилиндра с пластиной. Моделирование разрушений осуществлялось с помощью кинетической модели разрушения активного типа. Представлены расчетные хронограммы, иллюстрирующие характер распределения изолиний удельного объема трещин в пластине толщиной 2 мм при взаимодействии с ней компактного цилиндра, высота и диаметр которого равны 1.6 мм. Графики представляют картину разрушения в пластине после встречи со скоростью 1000 м/с. К этому моменту помимо лицевого разрушения формируются очаги разрушения вблизи тыльных поверхностей цилиндра и пластины. Расчеты показывают, что разрушение вблизи лицевой поверхности в данном случае обусловлено возникновением растягивающих напряжений, вызванных взаимодействием волн разгрузки от лицевой поверхности пластины и боковой поверхности цилиндра.

1. Хореев И.Е., Горельский В.А. Численное моделирование откольных разрушений при осесимметричном взаимодействии твердых тел // Детонация: Материалы II Всесоюз. совещ. по детонации.- Черноголовка, 1981. - С.149 - 153.

2. Горельский В.А., Радченко А.В., Толкачев В.Ф. и др. Кинетические механизмы перфорации пластин // Проблемы прочности. – 1987. – С. 77 – 80.

Динамика трехмерного процесса несимметричного взаимодействия деформируемых тел с жёсткой стенкой

В.А. Глазырин, В.А. Горельский, Е.А. Минакова (Томск)

В данной работе рассмотрена трехмерная задача взаимодействия деформируемого тела вращения (цилиндра) с жесткой стенкой. Вектор скорости осесимметричного ударника до начала взаимодействия совпадает с его осью симметрии и образует с нормалью к преграде угол α. На контактной поверхности между ударником и жесткой стенкой реализуется условие скольжения без трения.

Для решения сформулированной задачи используется метод конечных элементов [1,2]. На основе этого метода строится дискретная модель тела, состоящая из конечного числа связанных соответствующим образом в угловых точках конечных элементов. Уравнение движения для типичного конечного элемента сплошной среды выводится с учетом принципа возможных скоростей. Исследовано взаимодействие стального цилиндра диаметром 0,0125 м и длиной 3 диаметра с жесткой стенкой. Скорость ударника составляла 300 м/с. Угол встречи варьировался от 0 до 75^0. Возможность детально проследить процесс взаимодействия реализовывалась построением на графопостроителе конфигураций ударников в последовательные моменты времени. Процесс несимметричного взаимодействия деформируемого цилиндра с жесткой стенкой имеет многостадийный характер. Анализ кривых позволяет выделить четыре характерные стадии процесса: деформация передней части и изгиб ударника; движение цилиндра вдоль преграды с его одновременным вращением; удар тыльным концом по препятствию и его деформация; скольжение ударника по стенке с последующим отходом от неё. Данные стадии по-разному выражены для тех или иных углов соударения как в качественном и количественном отношении, так и по продолжительности их действия. В исследованном диапазоне начальных условий выявлено наличие в интервале 60 – 75^0 значения угла встречи, при котором качественно меняется механизм взаимодействия, при меньших значениях угла характеризующийся наличием стадии, когда контакт ударника с преградой отсутствует ещё до полного завершения процесса.

1. Johnson G.R. High velocity impact calculation in three dimensions. – J. Appl. Mech., 1977, v. 44, №1.

2. Хореев И.Е., Горельский В.А., Осесимметричный откол в задачах широкодиапазонного взаимодействии твердых тел. – ДАН СССР, 1983, т. 271, №3

Кинетическая трактовка структурно-временного критерия разрушения

П.А. Глебовский, Ю.В. Петров (С. Петербург)

В работе рассматривается критерий инкубационного времени разрушения с учетом кинетической концепции прочности С.Н. Журкова. С точки зрения кинетической концепции разрушение рассматривается как непрерывно развивающийся процесс, который начинается сразу после приложения к телу нагрузки, причем процесс состоит в разрыве межатомных связей и постепенном накоплении их в разрываемом материале.

Введение в критерий инкубационного времени термофлуктуационного механизма разрушения оказывает существенное влияние на положение статической ветви временной зависимости прочности для некоторых материалов.

Построены расчетные временные зависимости прочности для ряда материалов. Для анализа экспериментальных данных используется структурно-временной критерий разрушения, позволяющий построить единую кривую временной зависимости прочности для квазистатического и высокоскоростного кратковременного нагружения.

Получено аналитическое выражение для температурной зависимости инкубационного времени, а также найдено соотношение, связывающее инкубационное время разрушения с периодом тепловых колебаний атомов.

Математическая модель процесса ультразвуковой дефектоскопии пространственных трещин

Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, А.В. Ехлаков (Краснодар)

Разрабатывается математическая модель процесса ультразвуковой дефектоскопии заглубленных пространственных трещин произвольной ориентации в однородной среде и горизонтальных интерфейсных трещин на основе интегрального подхода, в рамках которого задача дифракции сводится к граничным интегральным уравнениям относительно скачка смещений на берегах трещины [1]. Эта модель включает основные этапы УЗ-контроля: описание волнового поля источника, решение задачи дифракции на трещине, регистрация отраженного сигнала и построение образа дефекта, получаемого при сканировании.

Для решения граничных интегральных уравнений используется вариационно-разностный метод [1], состоящий в разложении неизвестного скачка смещений по осесимметричным дельтообразным базисным функциям, заданным в узлах сетки, покрывающей с равномерным шагом область, занимаемую трещиной. Использование осесимметричного базиса позволяет существенно снизить вычислительные затраты.

На основе решения интегральных уравнений вычисляется обобщенный коэффициент отражения или аргумент электромеханической взаимности Аулда [2], который описывает изменения регистрируемого пьезоэлектрическим приемником сигнала при наличии дефекта. Разработанная математическая модель реализована в виде пакета программ для быстрого параметрического анализа [3]. Приводятся численные результаты, показывающие зависимость скан-образа трещины от соотношения ее размеров к длине волны, от формы и ориентации в пространстве.

Работа поддержана грантами РФФИ и CRDF (грант № REC-004).

1. Глушков Е.В., Глушкова Н.В. Дифракция упругих волн на пространственных трещинах произвольной в плане формы // Прикладная математика и механика. 1996. Т. 60, Вып. 2. С. 282-289.

2. Auld B.A. General electromechanical reciprocity relations applied to the calculation of elastic wave scattering coefficients // Wave Motion. 1979. Vol. 1. P. 3-10.

3. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Ехлаков А.В. Математическая модель ультразвуковой дефектоскопии пространственных трещин // Прикладная математика и механика. 2002. Т. 66, Вып. 1. С. 141-149.

Инженерный расчет вихревых аппаратов

И.В. Гневанов, О.В. Русакова (Пермь)

С момента открытия эффекта энергоразделения Ранка-Хилша прошло уже почти 70 лет, но до сих пор не было создано адекватных математических моделей, описывающих этот эффект. Несмотря на это, вихревые устройства создаются и широко используются в промышленности. Для быстрой оценки свойств вихревых аппаратов в зависимости от характерных параметров используется инженерный подход расчета вихревых аппаратов.

Опишем компьютерное решение для одного из таких подходов, основанного на работе [1]. Существует множество различных конфигураций вихревых труб (ВТ). Мы предполагаем, что речь идет об адиабатической противоточной цилиндрической ВТ с одним прямоугольным соплом.

В качестве исходных данных для расчета будем считать заданными: температуру охлаждаемого объекта, температурный напор между охлажденным потоком газа и охлажденным объектом, потребную холодопроизводительность, давление и температуру сжатого газа, физическую природу сжатого газа и перепад давления между средами.

В ходе расчета определяются основные геометрические размеры вихревой трубы (диаметр трубы, размер диафрагмы и площадь сечения входного сопла), режимные характеристики (доля холодного потока, эффективность температурного разделения), обеспечивающие потребные абсолютные эффекты энергоразделения, расход сжатого газа и расходы результирующих горячего и холодного потоков. При расчете площади сечения входного сопла также используются некоторые эмпирические величины, значения которых варьируются в разных источниках.

Программа позволяет не только определить основные геометрические параметры ВТ, но и ответить на вопрос о возможных допусках в параметрах. Кроме того, программа позволяет выполнить расчет при изменениях входных данных. Работоспособность программы была “проверена” на большом числе ВТ, используемых в промышленности и исследовательских лабораториях. К сожалению, оказалось, что, несмотря на большое количество собранных данных (больше 30), многие из них не являются полными. Выяснено, что параметры ВТ, используемых в промышленности, значительно отличаются от оптимальных. В частности, это связано с тем, что назначения и цели ВТ различны.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96402) и Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009-0).

Распространение волны уплотнения в перекрывающем глинистом слое при отборе жидкости из пласта

Б.Э. Гоголашвили (Казань)

Хорошо известно, что процессы фильтрации жидкости в пластовых системах и деформации окружающих горных пород взаимосвязаны. Как правило, причиной этого является наличие недоуплотненных глинистых слоев, перекрывающих эксплуатируемый коллектор. При вскрытии при эксплуатации пласта вода из этих слоев перетекает в пласт, а сами слои сжимаются под весом вышележащих горных пород. В данной работе исследуется новая модель этого процесса, предложенная в [1]. На основе этой модели ставятся задачи о водоотдаче и усадке глинистого слоя при вскрытии пласта одиночной скважиной, работающей в режимах заданного давления и заданного дебита.

При дополнительном принятии гипотезы постоянства горного давления были построены автомодельные решения указанных задач. Их характерной особенностью является значительно более медленный рост со временем размера воронки депрессии, чем тот, что определяется классическим уравнением пьезопроводности.

Автомодельные решения сравнивались с численным решением задачи в полной постановке. Показано, что выход на автомодельный режим реализуется, спустя короткое время после начала эксплуатации скважины.

Постановка задачи и разработка алгоритма исследования больших деформаций упругих тел

А.И. Голованов, А.С. Сенникова, Л.У. Султанов (Казань)

Данная работа посвящена разработке методики исследования напряженно - деформированного состояния упругих тел с учетом больших перемещений, поворотов и деформаций методом конечных элементов. Основная идея состоит в использовании метода пошагового нагружения в рамках комбинированного Лагранжево–Эйлерова описания деформации среды. В соответствии с этим подходом на каждом шаге нагружения для текущего состояния формулируется задача о деформировании среды с введением в рассмотрение векторов скорости и тензоров скоростей деформаций и поворотов. Напряженное состояние описывается тензором истинных напряжений Коши–Эйлера.

Для реализации этого подхода в работе путем линеаризации уравнения принципа виртуальных мощностей построено и приведено к удобному виду разрешающее уравнение, линейное относительно компонент вектора скорости.

Далее приводится конечноэлементная реализация на базе восьмиузловой трехмерной изопараметрической аппроксимации. Построены все необходимые соотношения для вычисления подынтегральных выражений в виде зависимостей от скоростей и вариаций узловых перемещений.

Исследование динамического поведения оболочек МКЭ

А.И. Голованов, А.Ф. Шигабутдинов (Казань)

В настоящей работе на основе МКЭ решаются некоторые задачи нестационарного деформирования оболочечных элементов конструкций. Объектом исследований являются оболочки малой и средней толщины. Расчёт ведётся по теории Тимошенко, предполагается линейное изменение геометрии и перемещений по толщине. При описании деформации оболочек используется статическая гипотеза о малости напряжений обжатия.

Для дискретизации задачи используется МКЭ. Среди множества конечных элементов непологих тонких оболочек особое место занимают так называемые вырождающиеся трёхмерные оболочечные элементы. В них элемент оболочки представляется в виде трёхмерного тела, в которое гипотезы, характеризующие механику деформирования тонких оболочек, закладываются на уровне построения матрицы жёсткости элемента. Конструкция разбивается на 9-ти узловые изопараметрические конечные элементы (КЭ), каждый КЭ оболочки представляет собой трёхмерное тело, у которого один из размеров меньше двух других [1]. Узловыми неизвестными служат проекции вектора перемещений на орты глобальной декартовой системы координат и углы поворота нормального волокна относительно базовых векторов касательной плоскости. Внутри КЭ используются аппроксимации одного порядка для геометрии и перемещений в виде биквадратичных полиномов.

Интегрирование уравнений движения ведётся численно методом обобщённого ускорения (методом Ньюмарка) [1, 2]. Предполагается, что в начальный момент известны геометрия конструкции, граничные условия для конструкции (их в общем случае пять для каждого края оболочки) и приложенные нагрузки. Считаем, что демпфирующие силы отсутствуют. Интервал времени разбивается на набор дискретных значений и строится последовательность решений. Для определения решения на (n+1) шаге используется решение, первая и вторая производные по времени на (n) - ом шаге. Схема имеет второй порядок точности и включает параметры, выбор которых позволяет сделать её устойчивой и наиболее точной. В результате определяются перемещения и напряжения как функции времени.

1. А.И.Голованов. Универсальный конечный элемент тонкой оболочки // Исследования по теории оболочек. Труды семинара. Выпуск XXV. Казань. 1990.

2. А.И.Голованов, Д.В. Бережной. Метод конечных элементов в механике деформируемых твёрдых тел. Казань: “ДАС”, 2001, 300 с.

3. И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: “Высшая школа”, 1985, 392 с.

Расчет многослойных оболочек МКЭ при упруго-пластическом деформировании в геометрически нелинейной постановке

А.И. Голованов, О.Н. Тюленева, С.А. Якушин (Казань)

При проектировании легких и экономичных конструкций часто приходится рассматривать деформацию тонкостенных элементов за пределами упругости, с учетом больших прогибов.

В настоящей работе описывается методика численного исследования напряженно-деформированного состояния многослойных анизотропных оболочек произвольной формы при больших прогибах в области упругих и пластических деформаций. Используются квадратичные изопараметрические конечные элементы в сочетании с шаговым методом, в котором разрешающие уравнения, полученные из принципа виртуальной работы, формулируются на каждом этапе нагружения относительно метрики деформированного состояния. При аппроксимации поля перемещений внутри конечного элемента принимаются гипотезы Тимошенко о линейности их распределения по толщине и малости деформаций и напряжений обжатия. Получены соотношения, необходимые для построения разрешающих матриц и векторов при использовании МКЭ, и описана процедура пересчета напряженного состояния при организации пошагового процесса.

Для учета физической нелинейности используется теория пластического течения, модель идеально упруго пластического тела. Применяется критерий пластичности Хилла для ортотропного материала, записанный с учетом малости напряжений обжатия.

Приводятся результаты решения тестовых задач.

Континуальное описание механического поведения зернистых композитов с использованием электронных таблиц

Л.А. Голотина, Л.Л. Кожевникова (Пермь), Л.В. Милякова (С. Петербург)

Разрабатываемый подход к макроскопическому континуальному описанию механического поведения зернистых полимерных композиционных материалов заключается в задании определяющих соотношений для исследуемых материалов в виде зависимости плотности потенциальной энергии деформирования от инвариантов тензора конечных деформаций, полученной на основе исследования процессов деформирования и разрушения структурных ячеек специального вида. Эта зависимость представляется не в аналитической форме, а в виде электронных таблиц, содержащих результаты решения краевых задач деформирования структурных ячеек на всех этапах их жизненного цикла. Для создания представительной базы данных, соответствующей возможно большему числу реализуемых в процессе деформирования сочетаний значений инвариантов, проведены исследования различных видов нагружения структурных ячеек, что позволило разработать и реализовать программу численных экспериментов.

Разработаны алгоритмы реализации метода конечных элементов и суперэлементов, позволяющие при исследовании напряженно – деформированного состояния изделий из зернистых композитов использовать данные, выбираемые непосредственно из электронных таблиц.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96492).

Подобие и моделирование процессов разрушения

Р.В. Гольдштейн (Москва)

Прогнозирование прочности и разрушения материалов и конструкций приводит к необходимости исследовать закономерности взаимосвязи процессов деформирования и разрушения, происходящих в материалах в различных масштабах, и возможности использования результатов испытаний лабораторных (как правило небольших) образцов и (или) малых моделей элементов конструкций для оценки условий разрушения натурных конструкций (в большинстве случаев существенно большего масштаба).

Говоря о масштабном эффекте, обычно имеют в виду зависимость номинальной прочности геометрически подобных образцов (элементов конструкций) от их характерного размера. Эта зависимость определяется закономерностями изменения напряженно - деформированного состояния и характеристик прочности и трещиностойкости материала от характерного размера тела.

Первая причина нашла свое отражение в трактовке масштабного эффекта, идущей от Галлилея. Вторая – привела к представлениям о статистической его природе, восходящим к Мариотту и нашедшим количественное выражение в теории прочности Вейбулла.

В середине 50-х годов было показано, что для тел с концентраторами напряжений из упругопластических материалов для описания масштабного эффекта прочности в дополнение к параметрам геометрического подобия необходимо ввести параметр размерности длины, связанный с градиентом напряжений вблизи концентратора (Г.В. Ужик). В 70-х годах аналогичные представления появились и при объяснении масштабного эффекта прочности бетона (З. Базант).

Развитие теории трещин и необходимость учета характеристик трещиностойкости среди параметров, определяющих масштабный эффект, привело к пересмотру представлений о подобии при разрушении тел с трещинами и концентраторами. Сформулированы условия подобия элементов конструкций с трещинами, позволившие предложить методики моделирования условий разрушения крупногабаритных конструкций (образцов) с трещинами по результатам испытаний их уменьшенных моделей при соответственно измененных условиях испытаний. Нередко оказывается, что процесс разрушения происходит в системе, в которой имеются резко различающиеся масштабы и большое количество параметров, определяющих поведение системы, что не позволяет выполнить моделирование ее разрушения в целом. В связи с этим предложены методики раздельного моделирования процессов, определяемых внешними и внутренними масштабами системы. Методики оказались эффективными, в частности, для моделирования процессов разрушения при взаимодействии ледяного покрова с конструкциями и с судами.

Численное исследование плавления над локальным источником тепла с учетом естественной конвекции

А.В. Гореликов, Е.Ю. Городенцев (Сургут)

Проведено численное исследование плавления над локальным источником тепла с учетом естественной конвекции в жидкой фазе. Такого рода задачи имеют непосредственную связь с теорией мантийных плюмов [1].

Процесс плавления рассматривался в цилиндрической полости с изотермическими стенками. В начальный момент времени полость целиком заполнена твердой фазой с начальной температурой ниже температуры фазового перехода. Процесс плавления начинался с того, что в центре нижней границы начинал действовать локальный источник тепла постоянной мощности. Задача решалась в осесимметричной постановке. Предполагалось, что для системы уравнений в жидкой фазе справедливо приближение Буссинеска. При численном моделировании использовался метод контрольного объема [2].

Был проведен ряд численных экспериментов, в которых варьировались мощность теплового источника и число Релея. Полученные результаты позволяют проследить эволюцию процесса плавления и зависимость высоты выплавленного канала (плюма) от времени при различных значениях мощности источника. В большинстве случаев имело место квазистационарное решение, т.е. высота выплавленного канала с определенного момента времени перестает изменяться, однако форма канала периодически меняется. Это происходит за счет того, что в нижней части канала одна за другой начинают образовываться локальные конвективные ячейки, которые перемещаются вверх по стволу плюма. По всей видимости плюм, в силу своей большой протяженности вдоль оси, параллельной направлению силы тяжести, является существенно нестационарной гидродинамической структурой. Результаты расчетов качественно совпадают с экспериментальными данными работы [1].

1. Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Гладков И. Н. Проблемы глубинной геодинамики и моделирование мантийных плюмов. Геология и геофизика, 1993, № 12, с. 5-24.

2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат. 1984.

Механика контактного взаимодействия и разрушения тел с покрытиями

И.Г. Горячева, Е.В. Торская (Москва)

Исследование контактного взаимодействия двух тел, на одно из которых нанесено покрытие, является актуальной задачей, позволяющей оценить вероятность разрушения покрытия и тип разрушения.

Задача исследуется с учетом таких параметров, как геометрия контактирующих тел (в том числе учитывается шероховатость одного из тел), толщина покрытия, относительная твердость покрытия, степень сцепления покрытия с подложкой [1].

Осесимметричная задача решается с помощью интегральных преобразований Ханкеля. Пространственная задача, при постановке которой учитывается наличие трения между телами, исследуется с помощью двойных интегральных преобразований Фурье [2]. В обоих случаях для определения контактного давления и размеров области контакта используются итерационные процедуры.

Определяется напряженное состояние в покрытии, в основании и на границе их раздела. Анализируется влияние относительной толщины, относительной твердости покрытия, степени сцепления покрытия с основанием, а также макро - и микрогеометрии взаимодействующих тел и коэффициента трения на распределение напряжений, в частности, на величину максимальных значений напряжений и на местоположение этих максимумов. Особое внимание уделяется максимальным касательным, растягивающим и нормальным напряжениям, концентрация которых может привести к разрушению покрытия. В частности, показано, что в относительно твердых тонких покрытиях растягивающие напряжения концентрируются на границе раздела покрытия с основанием со стороны покрытия, что может привести к появлению вертикальных трещин, идущих вглубь покрытия. Максимальные касательные напряжения также концентрируются на границе раздела покрытия с основанием со стороны покрытия для относительно твердых, и со стороны основания для относительно мягких покрытий. При циклическом нагружении граница раздела является вероятным местом начала разрушения, связанного с накоплением усталостных повреждений (т.е. отслаивания покрытия).

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М: Наука, 2001.

2. Торская Е.В. Исследование влияния трения на напряженное состояние тел с покрытиями. // Трение и износ, 23 (2002), N 2, сс 16-23.

Нелинейная эволюция вихревой структуры в возбужденном молекулярном газе

Ю.Н. Григорьев, И.В. Ершов (Новосибирск)

В последние годы внимание исследователей привлекло влияние возбуждения энергетических уровней молекул на ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) и генерацию турбулентности в течениях молекулярных газов. В работе [1] показано, что при гиперзвуковом обтекании пластины учет термической неравновесности может существенно изменить характеристики линейной устойчивости потока, причем влияние может быть как стабилизирующим, так и дестабилизирующим. Однако рост возмущений может прекратиться на нелинейной стадии, в связи с чем представляет интерес исследовать нелинейное взаимодействие возмущений конечной амплитуды с основным потоком. Из сценариев ЛТП и генерации турбулентности следует, что оба процесса нелинейны и реализуются через зарождение, эволюцию и распад характерных вихревых структур. При этом генерацию турбулентности можно рассматривать как процесс ЛТП, случайно повторяемый во времени и пространстве. Это дает возможность оценить влияние термической неравновесности на нелинейной стадии развития возмущений, моделируя взаимодействие организованных вихревых структур со средним течением.

В работе в рамках модели релаксационной газодинамики выполнено численное исследование эволюции крупной вихревой структуры в сдвиговом потоке молекулярного газа. Возбужденные степени свободы молекул описывались релаксационным уравнением Ландау – Теллера. Для оценки влияния параметра возбужденности внутренних степеней свободы на эволюцию возмущения (генерацию турбулентности) использовалось уравнение интегрального производства энергии возмущений (турбулентности), выведенное в [2] специально для модельной ячейки без предположения о малости возмущений. Результаты численного моделирования динамики вихревой структуры в сдвиговом потоке позволяют сделать качественный вывод, что возрастание возбуждения внутренних степеней свободы подавляет рост возмущений на нелинейной стадии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-00827).

1. Bertolotti F.B. The influence of rotational and vibrational energy relaxation on bondary-layer stability. // J. Fluid Mech., 372, 1998, p. 93-118.

2. Grigoryev Yu. N., Ershov I.V. The organized vortex structure in relaxing gas flow. // Inter. Conf. on the Method of Aerophysical Research (ICMAR-20002), 1–7 July, 2002, Novosibirsk, Russia. Proceedings Part II / Ed. by A.M. Kharitonov. Novosibirsk: Publishing House “Nonparel”, 2002, p. 68 – 72.

Физико-химическая гидродинамика и оптимизация плазмохимических реакторов травления

А.Г. Горобчук, Ю.Н. Григорьев (Новосибирск)

Интерес к исследованию процессов в плазмохимических реакторах (ПХР) определяется их широким применением в технологии производства интегральных схем. Большое число и сложная взаимосвязь факторов, определяющих качество и скорость обработки образцов, сильно ограничивают возможности эмпирической оптимизации. Естественной альтернативой является оптимизация на основе математического моделирования, для которой необходимы адекватные численные модели.

В результате исследований авторов разработана численная модель и создана программа для моделирования плазмохимических реакторов травления на основе уравнений Навье-Стокса в приближении Обербека-Буссинеска, включающая сложный теплообмен и многокомпонентную кинетику реагирующей газовой смеси. Модель содержит оригинальные элементы, улучшающие ее прогностические возможности: учет ИК-излучения многоатомных молекул, образующихся в ПХР, включение процесса термодиффузии, адекватные газофазную и гетерогенную кинетики, эффекты разреженности. На ее основе исследованы: оптимизация реакторов в изотермическом приближении [1], эффекты температурной неоднородности [2], влияние разреженности [3], адекватность распространенных моделей химической кинетики [4], оптимизация процесса травления в смеси исходных газов [5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-01-00160).

1. Григорьев Ю.Н., Горобчук А.Г. Численная оптимизация планарных реакторов индивидуального плазмохимического травления // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -1996. -N2. -С.47-63.

2. Григорьев Ю.Н., Горобчук А.Г. Эффекты неизотермичности в плазмохимическом реакторе травления // Микроэлектроника. -1998. -Т.27. -N4. -С.294-303.

3. Grigoryev Yu.N., Gorobchuk A.G. Advanced numerical models of plasma - chemical etching of silicon // Proceedings of The Sixth Japan - Russia Joint Symposium on Computational Fluid Dynamics. (September 21-23, 1998, Nagoya University, Nagoya, Japan) -1998. -PP.68-71.

4. Grigoryev Yn.N., Gorobchuk A.G. Peculiarities of Si Films Etching in CF_4 Parent Gas // Proceedings of 22 International conference on microelectronics. "MIEL-2000". (May 14-17, 2000, Nis, Yugoslavia) -2000. -Vol.1. -PP.289-292.

5. Григорьев Ю.Н., Горобчук А.Г. Оптимизация состава смеси для травления Si в CF_4/O_2. // Вычислительные технологии. -2001. -Т.6. -Часть2. -С.217-224.

Возникновение и исчезновение вихрей в ламинарном течении: ряд вихрей Калашникова-Циклаури и эффект Noto

А.В. Гудзовский (Москва)

В численных экспериментах [1] изучены два вида неустойчивости течения жидкости, связанных с возникновением и исчезновением вихрей в ламинарном потоке, – ряд вихрей Калашникова-Циклаури (КЦ) [2] и эффект Noto [3]. Дано физическое объяснение явлений (механизмов неустойчивости), воспроизведены наблюдаемые в опытах картины течения.

Ряд вихрей КЦ наблюдается в ячейке со скрещенными под прямым углом вертикальными щелевыми каналами равной ширины d. Ячейка ограничена двумя плоскими горизонтальными торцами. Высота ячейки и длина каналов (ветвей креста) много больше d. Через одну пару противоположных ветвей подается жидкость, отводимая через другую пару ветвей. Расходы жидкости через ветви равны. При малых числах Рейнольдса Re наблюдается стационарное течение с особенностью типа седловой точки на вертикальной оси ячейки. При увеличении Re свыше $Re1$ (порядка 50) в ячейке формируется ряд стационарных вихрей с осями, направленными вдоль отводящих каналов. Направления вращения соседних вихрей противоположны. При уменьшении Re ниже $Re2<Re1$ вихри КЦ затухают. Полученные в расчете структура течения, $Re1$ и $Re2$ хорошо согласуются с опытными данными. Дано объяснение гистерезису и наблюдаемой в опытах зависимости $Re1$ и $Re2$ от высоты ячейки.

Эффект Noto наблюдается в вертикальном восходящем потоке воздуха, обтекающем горизонтально расположенный цилиндр круглого или треугольного сечения, - при нагреве цилиндра в следе за ним вихревая дорожка (ВД) сменяется тепловым факелом (ТФ). Нами рассмотрено плоское течение жидкости с числом Прандтля $0.025 \le Pr \le 7$ около тонкой изотермической пластины. В диапазоне чисел Рейнольдса $25 < Re \le 100$ и Ричардсона $0 \le Ri < 20$ найдены границы устойчивости режимов ТФ и ВД. Установлены области мягкого и жесткого переходов, разделенные тройной точкой. Дано объяснение зависимости от Pr положения границ устойчивости режимов. Обнаружено, что направление вращения или расположение вихрей в следе может отличаться от наблюдаемого в дорожке Кармана.

1. Гудзовский А.В. Вихри Калашникова-Циклаури. Численный эксперимент // ЖВММФ. 2001. т. 41. № 8. с. 1250-1262. Гудзовский А.В. Течение над теплой пластиной, омываемой восходящим потоком // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 2 (в печати).

2. Калашников В.Н., Циклаури М.Г. Упорядоченные трехмерные структуры, возникающие в результате неустойчивости плоского потока в скрещенных щелях // Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 2. С. 3-8.

3. Noto K., Ishida H., Matsumoto R. Breakdown phenomenon of the Karman vortex street due to the natural convection // AIAA Paper. 1984. № 84-1547. 7 p.

Нелинейные краевые задачи для полиэтиленовых труб со стальной арматурой

М.А. Гуляева, В.Ю. Зуйко, С.Г. Иванов (Пермь)

Металлопластовые трубы изготавливаются из полиэтилена низкого давления (ПЭНД) и армируются проволочным каркасом из малоуглеродистой стали в окружном и осевом направлениях. Такие трубы обладают одновременно химической стойкостью, благодаря полимеру, и высокой прочностью, благодаря металлическому каркасу.

В пакете ANSYS 5.5 на ячейке периодичности численно решена нелинейная трехмерная краевая задача теории малых упруго-пластических деформаций для трубы, нагруженной внутренним давлением и осевой растягивающей силой. Учитывается упругопластическое поведение стальной арматуры и полиэтилена при условии идеального контакта полиэтилена и арматуры. Данная задача моделирует поведение металлопластовой трубы на испытательном стенде при проведении испытаний. Созданная модель позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние арматуры и полиэтиленовой стенки на различных этапах нагружения. Построена расчетная диаграмма деформирования трубы в координатах внутреннее давление – окружная деформация, осредненная по наружной поверхности ячейки.

Еще одним источником нелинейного поведения рассматриваемых конструкций является отсутствие идеального контакта между полиэтиленом и стальной арматурой. Для оценки возможности продавливания полиэтилена через металлический каркас численно решена двумерная осесимметричная нелинейная контактная задача теории упругости для трубы без осевой арматуры, нагруженной внутренним давлением. Предполагается отсутствие проникновения одного материала в другой и отсутствие трения между арматурой и полиэтиленовой матрицей. Полученное решение сравнивается с ранее полученными результатами [1], где контакт элементов конструкции трубы считался идеальным.

1. Зуйко В.Ю., Гуляева М.А., Иванов С.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлопластовых труб при испытаниях // Тр. Матем. центра им. Н.И.Лобачевского. Т. 16. Модели механики сплошной среды. Материалы XVI сессии Междунар. школы по моделям механики сплошной среды, 27 июня – 3 июля 2002 г., Казань. – Казань: Изд-во Казанск. матем. об-ва, 2002. – С. 179–185.

Критерии устойчивости вязкоупругих пластин

А.В. Гурьянов, В.И. Желтков (Тула)

Рассматривается задача о поперечных колебаниях вязкоупругих пластин при малых деформациях с учетом влияния мембранных сил на деформации изгиба, что соответствует постановке задачи устойчивости по Эйлеру. Мембранные силы считаются известными функциями времени и координат. Решение задачи отыскивается в рамках вариационной постановки с представлением поперечного перемещения разложением по формам свободных колебаний линейно-упругой пластинки. Для определения коэффициентов разложения сформулирована система обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Для ее решения используется процедура последовательных приближений.

Понятие устойчивого состояния пластинки формулируется как возможность реализации затухающих поперечных колебаний при действии заданных мембранных сил. Сформулированы несколько вариантов критериев устойчивости, включающих в себя интегральные характеристики свободных движений пластинки, мембранных сил и внешних поперечных нагрузок.

Детально рассмотрен простейший случай постоянных во времени мембранных сил. Анализ устойчивости при этом сводится к изучению корней характеристического уравнения. Проведен анализ влияния параметров ядра релаксации изотропной пластинки на критическую силу при равномерном распределении ее компонент по срединной плоскости при различных комбинациях нормальных и сдвиговых компонент мембранных сил.

Граничные задачи динамической теории упругости для изотропного пространства с дефектом в плоскости

А.А. Гусенкова (Казань)

Предлагается соответствующий классическому методу комплексных потенциалов метод потенциальных функций с использованием преобразования Фурье в классе медленно растущих распределений для решения хорошо известных задач теории упругости для тел с дефектом, расположенным в плоскости [1,2]. Показано, что при использовании преобразования Фурье по всем переменным решение динамической задачи также может быть представлено через скачки напряжений и перемещений на дефекте.

Рассматривается корректность преобразованной задачи для анизотропной среды (в терминах аналога условия Лопатинского). Решение системы уравнений Гельмгольца, к которой сводится система уравнений Ламе, выражается через скачки напряжений и перемещений на дефекте, и может быть найдено в результате решения соответствующей системы сингулярных интегральных уравнений. Численное решение системы получено для случая, когда дефект является трещиной.

1. Поручиков В.Б. Методы динамической теории упругости. - М.: Наука, 1986. – 328 с.

2. Гусенкова А.А. Метод потенциальных функций в задачах теории упругости для тел с дефектом // ПММ. - 2002. Т. 66. - Вып. 3. - С. 470-480.

Математическое моделирование дилатансионных эффектов при динамических нагружениях

А.В. Давыдов, В. В. Зуев (Москва)

Работа посвящена актуальной проблеме математического моделирования нелинейных динамических процессов в деформируемых твердых телах с учетом влияния на процесс разрушения необратимых объемных деформаций. В качестве базовых определяющих соотношений используются предложенные ранее соотношения теории пластичности, сформулированные в пространстве полных деформаций и позволяющие описывать эффекты упрочнения и разупрочнения, необратимые объемные деформации, в частности, явление дилатансии. Обобщенное соотношение Мизеса-Шлейхера, коэффициенты которого зависят от уровня достигнутых необратимых деформаций, рассматривается как условие текучести.

В качестве модельной рассмотрена фундаментальная задача механики деформируемого твердого тела об одномерном продольном динамическом нагружении пластин, выполненных из упруго-пластического материала, обладающего необратимыми объёмными деформациями, зависящими как от первого, так и от второго инварианта тензора напряжений (учёт эффекта дилатансии), переменными пределами текучести (пластичность с упрочнением и разупрочнением).

Проведено большое количество численных экспериментов для разнообразных вариантов динамического нагружения пластин, материалы которых обладают различными свойствами, связанными с разрушением и объёмным деформированием. Обнаружены важные механические эффекты, в частности показано, что учёт дилатансии даёт заметный рост объёмных необратимых деформаций и интенсивности пластических деформаций сдвига в случае разупрочнения по сравнению с традиционной моделью идеально пластического тела.

Применение концепции фракталов к моделированию процесса накопления повреждений и анализу поверхностей разрушения

М.М. Давыдова (Пермь)

Понятия теории фракталов и ее математический аппарат широко используются для описания морфологических и динамических особенностей процессов и объектов. Цель настоящей работы - представить три примера применения концепции фракталов для изучения различных аспектов процесса разрушения.

Первый – это модель роста перколяционного кластера “разрушения”, описывающая переход от дисперсного накопления повреждений к образованию магистральной трещины. Процесс моделирования (МКЭ - программа) включает следующие стадии разрушения: накопление дисперсного повреждения в образце; образование и рост кластеров “разрушения”; формирование финального перколяционного кластера, состоящего из “начального” надреза и присоединившихся соседних кластеров. Ключевую роль в предложенном подходе играют нелинейные определяющие сотношения для параметра поврежденности. Фрактальные характеристики системы коррелируют с нелинейной кинетикой накопления дефектов в материале.

Второй – это статистическое исследование поверхности разрушения образцов из полиметилметакрилата. Шероховатые поверхности представляют собой масштабно - инвариантные критические объекты, для которых локальная высота z (вертикальная координата профиля поверхности) зависит от горизонтального смещения r как $z \propto r^{\zeta}$, где $\zeta < 1$ - показатель Херста. Последний изменяется в интервале от 0.70 до 0.95 и зависит от скорости распространения трещины.

Третий – моделирование поверхности разрушения с параметрами шероховатости, близкими к экспериментальным. Для “сконструированной” поверхности определяется показатель Херста в различных вертикальных сечениях, а также фрактальная размерность в горизонтальном сечении, вычисление которой производится с использованием соотношения периметра и площади.

Исследование влияния различных механизмов и процессов пластической деформации скольжения на деформационное упрочнение гетерофазных материалов с недеформируемыми частицами

О.И. Данейко, Т.А. Ковалевская, С.Н. Колупаева, Е.В. Комарь (Томск)

Дисперсно-упрочненные сплавы занимают значимое место среди высокопрочных материалов современной техники. Введение в материал дисперсной недеформируемой упрочняющей фазы ведет к существенному усложнению объекта моделирования. Взаимодействие дислокаций с частицами в процессе пластической деформации, помимо упрочняющего эффекта, приводит к появлению ряда новых элементов дислокационной структуры (кольца Орована, призматические петли, дипольные конфигурации). Между этими структурными элементами в ходе деформации и последующих релаксационных процессов возможны взаимные превращения. При этом характер и результат взаимодействий элементов дислокационной структуры с частицами может меняться с изменением соотношений масштабных характеристик упрочняющей фазы (размеры, форма частиц, расстояния между частицами).

Для исследования роли различных механизмов и процессов пластической деформации используется математическая модель, сформулированная на основе атомно-дислокационной интерпретации концепции упрочнения и отдыха. Модель включает уравнения баланса сдвигообразующих дислокаций, вакансионных и межузельных призматических петель, дислокаций в дипольных конфигурациях вакансионного и межузельного типа, вакансий, бивакансий и межузельных атомов, а также уравнение, связывающее скорость деформации с характеристиками дефектной структуры и внешнего воздействия.

Показано, что для гетерофазных материалов с недеформируемыми частицами существует некоторая критическая плотность дислокаций, определяемая масштабными характеристиками упрочняющей фазы, при превышении которой качественно изменяется характер дефектной структуры зоны сдвига. В условиях докритической плотности дислокаций основными элементами дислокационной подсистемы являются сдвигообразующие дислокации и призматические петли. В закритической области к ним добавляются дипольные дислокационные конфигурации.

Проведено исследование влияния масштабных характеристик упрочняющей фазы, внешнего воздействия, исходного состояния дефектной подсистемы и различных механизмов генерации и аннигиляции дефектов на кривые деформационного упрочнения и эволюцию составляющих деформационной дефектной подсистемы ГЦК монокристаллов гетерофазных материалов в условиях деформации с постоянной скоростью деформирования.

Новый метод решения статической задачи несимметричной теории упругости

В.М. Деев (Пермь)

Рассматриваются два связанных векторных уравнения линейной задачи. Было получено, что лапласиан дивергенции вектора перемещения равен нулю, полилапласиан дивергенции вектора поворота пропорционален дивергенции вектора поворота, билапласиан вектора перемещения пропорционален ротору лапласиана вектора поворота. Эти соотношения позволили расщепить рассматриваемую систему. Для вектора перемещения получено уравнение четвертого порядка, которому можно придать вид уравнения Ламе относительно линейной комбинации вектора перемещения и его лапласиана, а для вектора поворота — уравнение четвертого порядка, которое по отношению к лапласиану вектора поворота является уравнением типа Гельмгольца - Векуа. При помощи представлений векторов, являющихся решениями уравнения Ламе, через гармонические и бигармонические функции получен удобный алгоритм решения задачи. Была также получена зависимость, связывающая упругие постоянные.

Приближение временных корреляционных функций при компьютерном моделировании процессов магнитной динамики твердых растворов суперпарамагнитных наночастиц

А.Г. Деменев (Пермь)

Пока нет теории, которая позволяла бы последовательно объяснить весь спектр явлений, свойственный высокодисперсным магнитным материалам. Это связано с тем, что в этих материалах имеет место иерархия величин межчастичных взаимодействий, определяющих процессы магнитной динамики, в очень широком диапазоне значений. Имеется ряд полуэмпирических теорий, позволяющих качественно объяснить результаты экспериментов, а также, используя подгонку двух или более эмпирических параметров моделей, получить неплохое количественное согласие. Но попытки экстраполировать полученные формулы за пределы конкретного эксперимента при таком подходе не слишком корректны. Имитационное моделирование потенциально могло бы стать независимым источником определения параметров полуэмпирических теорий. Результаты такого моделирования могли бы позволить оценить диапазоны применимости приближений, принимаемых в этих теориях. Перспективно использование метода, предложенного впервые в [1] и развитого в дальнейшем [2], который позволил описать ряд фундаментальных процессов спиновой динамики в магниторазбавленных твердых телах. Магнитная динамика в таких системах и рассматриваемых в данной работе во многом подобна, так как определяется магнитодипольными межчастичными взаимодействиями. Но рассматриваемые системы суперпарамагнитных наночастиц обычно имеют достаточно большой разброс величин магнитных моментов частиц, обусловленный разбросом размеров. Предлагается в ходе моделирования рассчитывать временные корреляционные функции в монодисперсном приближении. Учет полидисперности можно произвести, если полученные корреляционные функции усреднить по величине магнитного момента, используя известную из полуэмпирических теорий основную временную асимптотику.

Работа выполнена на базе кафедры теоретической физики Пермского государственного университета в рамках научной стажировки по проекту «Развитие и применение методов компьютерного моделирования процессов многомасштабной нелинейной динамики спиновых систем» (2002-2003 гг.). Работа выполнена при финансовой поддержке администрации Пермского государственного педагогического университета.

1. А.Г. Деменев, Е.К. Хеннер /Радиоспектроскопия, вып.21, Перм.ун-т, Пермь, 1993, с.6.

2. А.Г. Деменев //Математическое моделирование. Т.8. N8. 1996. С.47.

Распределение примеси в расплавах полупроводников при воздействии вращающегося магнитного поля в процессах выращивания кристаллов по методу плавающей зоны

В.А. Демин, Д.В. Любимов, Т.П. Любимова (Пермь)

Как известно, конвективные движения в жидкой зоне оказывают влияние на свойства полупроводниковых кристаллов, поэтому вопросы управления распределением примесей в расплаве, и, как следствие, в кристалле являются на сегодняшний день чрезвычайно актуальными. В работах [1,2] показано, что вращающееся магнитное поле (ВМП) вызывает в жидкой зоне движение в азимутальном направлении, при этом с ростом магнитного аналога числа Тэйлора интенсивность конвективного движения в меридиональной плоскости уменьшается. В данной работе производится расчет распределения легкой примеси в цилиндрической жидкой зоне. Нагрев зоны производится с помощью кольцевого нагревателя, что приводит к возникновению термокапиллярной конвекции в расплаве в форме двух симметричных тороидальных вихрей. Вращающееся в горизонтальной плоскости постоянное по величине магнитное поле приводит к уменьшению интенсивности конвективного движения в меридиональной плоскости, при этом появляется азимутальное движение в направлении вращения магнитного поля. При внесении в расплав легкой компоненты вследствие сложного течения, имеющего как меридиональную, так и азимутальную составляющую, происходит перераспределение примеси. Расчеты, выполненные численно методом сеток, показали, что в отсутствие магнитного поля примесь (легкая компонента) собирается на свободной границе в центре жидкой зоны, а при умеренных значениях магнитного числа Тэйлора распределение примеси в жидкой зоне вблизи границы кристаллизации становится более однородным. Результаты расчетов показывают, что воздействие на расплав ВМП является перспективным методом управления распределением примеси в полупроводниковых кристаллах, выращиваемых по методу жидкой зоны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-01-96414) и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № РЕ 009-0).

1. Демин В.А., Любимов Д.В., Любимова Т.П., Ру Б. Влияние вращающегося магнитного поля на термокапиллярную конвекцию в жидкой зоне // Сб. Гидродинамика, Изд-во Пермск. ун-та, Пермь, 2002, с. 76-88.

2. Marty P., Walker J.S., Witkowski L.M. Liquid-metal flow in a finite-length cylinder with a high-frequency rotating magnetic field // J. Fluid Mech., v. 436, 2001, pp. 131-143.

Использование метода прямого численного моделирования (DSMC) в задачах газодинамики

К.С. Денисов, В.И. Токманцев (Екатеринбург)

Расчёт полей параметров газа в сложных условиях (ударная волна, чисто трёхмерное течение) решением уравнений Навье-Стокса не даёт правильной картины течения. Её можно получить, напрямую моделируя газ как совокупность движущихся молекул. Была написана программа, реализующая метод прямого численного моделирования в трёхмерном случае. С помощью неё получены картины течений, согласующиеся с эспериментом.

Лабораторный динамо эксперимент – Пермский проект

С.А. Денисов, В.И. Носков, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик, С.Ю. Хрипченко (Пермь)

Магнитогидродинамическое динамо (МГД-динамо) - это явление возбуждения магнитного поля движущимися потоками проводящей жидкости, и именно оно является основным источником магнитных полей в астрофизике. Теория динамо активно развивается, начиная с середины 60-х годов, но экспериментальное изучение эффекта в лабораторных условиях стало возможным только в последние годы. На сегодня лабораторные динамо-проекты реализуются в ряде физических лабораторий (только два из них уже сумели зарегистрировать эффект).

В данном докладе приводится краткий обзор идей, лежащих в основе каждого проекта, и состояния дел по их реализации. Подробно изложены исследования, проводимые в рамках пермского динамо-проекта. В отличие от остальных проектов, этот проект ставит своей задачей изучение МГД-динамо в нестационарном потоке[1]. В эксперименте винтовой поток жидкого металла должен быть создан в тороидальном канале, который быстро вращается, а затем резко тормозится.

В докладе приводятся результаты экспериментального исследования динамики нестационарного турбулентного потока в тороидальном канале, результаты численного расчета эволюции магнитного поля в таком потоке и обсуждается конструкция МГД-установки.

1. Frick P., Noskov V., Denisov S., Khripchenko S., Sokoloff D., Stepanov R., and Sukhanovsky A. Non-stationary screw flow in a toroidal channel: way to a laboratory dynamo experiment // Magnetohydrodynamics. 2002. V.38. N.1-2. P.136-155.

Фотоупругий эффект в холестерических жидких кристаллах

О.А. Денисова, А.Н. Чувыров (Уфа)

Исследовано два частных случая распространения упругих волн в холестерическом жидком кристалле (ХЖК): в одном случае волновой вектор ***k*** лежит в плоскости XOY и совпадает с осью OZ, параллельной оси холестерической спирали, а в другом – волновой вектор перпендикулярен OZ. В случае холестерического жидкого кристалла для описания распространения ультразвуковой волны кроме функций плотности звуковой энергии, среды, момента количества движения вводят переменную, связанную с шагом и углом наклона спирали. В первом случае внутренняя структура ХЖК не оказывает существенного влияния на распространение ультразвуковой волны, а скорость звука, фактически, совпадает со скоростью звука изотропной фазы. Во втором случае появляется «второй» звук, для которого скорость $c_{\perp}$ определяется волновым вектором q_o спирали ХЖК, причем $c_{\perp} \sim q_o$. Поэтому в изотропной фазе $c_{\perp} \equiv 0$. Так как в этой ситуации изменяются параметры спирали, то при распространении ультразвуковой волны должны изменяться оптические свойства ХЖК.

С учетом этого обстоятельства была разработана специальная экспериментальная методика регистрации таких изменений, в основу которой положены принципы модуляционной спектроскопии. Этот метод позволяет точно измерять тонкие изменения в оптических спектрах, не регистрируемых обычными оптическими спектрометрами. Суть метода состоит в следующем: воздействие ультразвуковой волны периодически изменяет шаг спирали ХЖК, и, соответственно, длину волны при селективном рассеянии света, а при монохроматическом излучении – интенсивность рассеянного светового потока. Эти изменения регистрируются фотоприемником, выделяются из шумов и преобразуются к удобному для измерений виду системой фазочувствительного детектирования, например, представляются в виде отношения переменной и постоянной составляющих сигнала.

Проведенные измерения позволили обнаружить модуляционные особенности в спектре отражения ХЖК в области селективного отражения света для данного типа кристалла. Восстановленный спектр отражения показал полное совпадение с формой линии селективного рассеяния в равновесном состоянии ХЖК.

Резонансное поглощение поперечных акустических волн в холестерических жидких кристаллах

О.А. Денисова, А.Н. Чувыров (Уфа)

Исследовано явление резонансного поглощения поперечных акустических волн в холестерическом жидком кристалле (ХЖК). Считалось, что волновой вектор пространственной спирали параллелен оси *OZ* и перпендикулярен вектору скорости υ_o, задаваемой подвижной пластиной. Длина поперечной волны сравнима с шагом спирали. Тогда распространение волны будет описываться уравнениями гидродинамики жидких кристаллов (ЖК), при этом объемная сила $f_i = 0$ и $G_i = 0$, а сами уравнения примут вид:

$$\rho \frac{d\upsilon_i}{dt} = \frac{d\delta_{ij}}{dx_j} + g_i,\ g_i = -\frac{dp}{dx_i}. \qquad (1)$$

Здесь δ_{ij} – тензор вязкоупругих напряжений ХЖК. Начальная ориентация директора имеет вид: $n_x^0 = \cos q_0 z, n_y^0 = \sin q_0 z, n_z^0 = 0$. Выбирая возмущения директора dn_x, dn_y, dn_z малыми, имеем $n_x = n^0{}_x + dn_x, n_y = n^0{}_y + dn_y, n_z = n^0{}_z + dn_z$. Решения (1) для скоростей и угла ориентации спирали имеют резонансы, удовлетворяющие условию $k\text{-}2q_o=l\pi$, $l=0, 1, 2 \ldots$, k – волновой вектор звуковой волны.

Проведены экспериментальные исследования скорости поперечных акустических волн в твистовых структурах нематических жидких кристаллов (НЖК), т.е. в ситуации, когда волновой вектор спирали был равен $2\pi/d$, где d – толщина кристалла. Полученная зависимость имеет резонансный вид, определяемый спиралью ЖК - структуры. Однако это возможно только в случае, когда длина волны, распространяющейся в НЖК, сравнима с шагом спирали. С уменьшением шага спирали резонансы не регистрируются.

С целью дальнейшего уточнения этого предположения изучались твист - структуры, полученные в ячейках с планарной ориентацией на поверхности пластин, повернутых относительно друг друга на 90^0. Результаты экспериментов подтвердили, что наличие закрученности в ЖК приводит к резонансным явлениям при распространении поперечных акустических волн с длинами, сравнимыми с размерами образца ($d \sim 10 \div 15 мкм$). Для регистрации этого явления важна плоскопараллельность кюветы ячейки, в которую помещен ЖК. Появление клина приводит к исчезновению резонансов. По аналогии с резонансными явлениями в общей теории колебаний в нашем случае наблюдается изменение сдвига фаз $\Delta\varphi$ между опорно-возбуждающим колебанием и регистрируемым сигналом $U_{1\omega}$. Причем, в случае структур с пространственной дисперсией наблюдается резонансный характер изменения $\Delta\varphi$ от частоты, вблизи резонансов имеет место смена фаз на 2π.

Механика полимерных гелей

Е.Я. Денисюк (Пермь)

Химически сшитые полимерные гели и эластомеры способны поглощать низкомолекулярные жидкости, многократно увеличиваясь в объеме. При этом они сохраняют свою форму и способность к большим упругим деформациям. Внешняя механическая нагрузка, приложенная к набухшему гелю, может вызвать значительные объемные деформации, которые возникают в результате перераспределения растворителя в объеме материала или между материалом и жидкой фазой.

Данная работа посвящена теоретическому описанию термодинамически равновесных состояний полимерных гелей, находящихся в контакте с растворителем и подвергнутых произвольной механической нагрузке. Предложена общая система уравнений и определяющих соотношений, которая описывает такие состояния при больших и малых деформациях полимерной матрицы. Показано, что проблема описания термодинамически равновесного состояния полимерного геля может быть сформулирована как задача механического равновесия для сжимаемого упругого материала. Роль тензора напряжений в ней играет осмотический тензор напряжений, в котором содержится вся информация о равновесных термодинамических и упругих свойствах системы “гель – растворитель”. Получены явные выражения для осмотического тензора напряжений, основанные на различных моделях высокоэластичности – классической теории, теории Муни–Ривлина, Флори–Эрмана, Доя и Эдвардса.

Характерные свойства и поведение полимерных гелей продемонстрированы на модельных задачах, описывающих равновесные процессы их деформирования в среде растворителя при простых видах нагружения (одноосном и двухосном растяжении, сжатии, сдвиге, кручении). Изучена упругая реакция и равновесная степень набухания материала в этих условиях. В частности, показано, что растяжение геля в растворителе сопровождается дополнительным поглощением жидкости, в результате чего образец испытывает значительные объемные деформации. Однако при достаточно больших деформациях, при которых сказывается конечность длины цепей полимерной сетки, происходит обратный процесс – “выдавливание” растворителя из образца и уменьшение его объемных деформаций с увеличением степени растяжения. Рассмотрена возможность определения физико-химических свойств полимерных гелей по экспериментальным данным, характеризующим упругое поведение образца при его деформировании в среде растворителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02–03–32845).

Неравновесные процессы деформирования и набухания полимерных сеток в низкомолекулярных растворителях

Е.Я. Денисюк (Пермь)

Рассматриваются связанные процессы деформирования и набухания высокоэластичных полимерных сеток (эластомеров и полимерных гелей) в низкомолекулярных растворителях, которые сопровождаются большими деформациями полимерной матрицы. Обсуждаются основные принципы теоретического описания таких процессов и формулируется общая система уравнений и определяющих соотношений, описывающая механодиффузионные процессы при больших и малых деформациях материала. Рассмотрен способ получения определяющих соотношений теории из известных моделей высокоэластичности и предложены их различные варианты для системы “полимерная сетка–растворитель”.

Общая теория применена для описания неравновесных процессов набухания полимерных сеток в растворителях в условиях постоянного и переменного одноосного и двухосного растяжения. Для этих случаев сформулированы соответствующие краевые задачи и выполнен их численный анализ. Получены приближенные автомодельные решения, описывающие асимптотические свойства диффузионных режимов набухания полимерных сеток на различных стадиях процесса. Исследована эволюция напряженно - деформированного состояния набухающего материала. Показано, что изменение во времени упругой реакции деформированного набухающего образца выглядит как типичный релаксационный процесс. Для конечной стадии набухания получено асимптотическое уравнение релаксационной кривой, с помощью которого можно исследовать транспортные свойства деформированных полимерных сеток по экспериментальным кривым, описывающим зависимость от времени упругой реакции образца, набухающего в растворителе.

Изучено влияние внешних механических нагрузок на диффузию растворителя в материале. Установлено, что с помощью механического нагружения полимерных сеток можно инициировать качественно различные диффузионные режимы. Это явление может быть использовано в технологии получения градиентных полимерных материалов для управления процессами насыщения полимерных сеток низкомолекулярными компонентами с помощью механического воздействия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02–03–32845).

О механохимической нестойкости жидкой воды

И.Н. Диденкулов, Г.А. Домрачев, Д.А. Селивановский , (Н.Новгород), П.А. Стунжас (Москва), В.В. Чернов (Н.Новгород)

Жидкая вода (так определяют воду, если ее температура в интервале 0 – 70^0C) – это сильно ассоциированная жидкость, свойства которой обусловлены существованием водородных связей. Практически все молекулы воды заключены в ассоциатах, которые постоянно перестраиваются, обмениваясь молекулами воды и изменяя свою конформацию. Температурные изменения размеров и плотности ассоциатов определяют экстремумы многих температурных характеристик жидкой воды (плотность – 4^0C, теплоемкость – 38^0C, скорость звука – 60^0C и др.). Ассоциатная структура воды проявляется также в ее реологических свойствах: в существовании сдвиговой упругости (Р.А. Апакашев, В.В. Павлов, МЖиГ, 1997). Сходные черты имеются у полимеров, их растворов и расплавов: в них также обнаруживаются температурные экстремумы и реологические особенности, которые, как считается, есть следствие конформационных перестроек макромолекул полимеров. При этих перестройках часть вещества полимера механохимически деструктурируется: любое механическое воздействие на полимеры приводит, наряду с перестройкой структуры, и к разрыву части химических связей в полимере. Механохимическая деструкция полимеров протекает при нормальных условиях при плотностях энергии воздействия на много порядков более слабых, чем энергия химических связей в полимерах. Таков механизм «старения» полимеров.

Мы предположили, что по аналогии с полимерами в жидкой воде также возможны механохимические реакции «деструкции»: диссоциации молекул воды с появлением радикалов ($H_2O \rightarrow \bullet H + OH \bullet$). Такая диссоциация воды наблюдалась в серии опытов. В них была определена эффективность диссоциации воды при действии вязкого трения, при поглощении водой ЭМ-излучения, при фазовых переходах воды (Домрачев Г.А. и др. Хим.Физ., 2001, №2). «Меткой» диссоциации воды служил появляющийся в воде пероксид водорода ($OH \bullet + OH \bullet \rightarrow H_2O_2$). Полученные данные, а также данные других исследователей интерпретируются с позиции изложенной гипотезы о механохимических превращениях в жидкой воде.

Об эффективности параллельных итерационных методов для линейных алгебраических систем

Е.В. Довольнов, С.В. Шешенин (Москва)

При решении систем линейных уравнений на параллельных компьютерах возникает проблема выбора предобуславливателя и собственно итерационного метода. Цель данного исследования состояла в оценке практической эффективности ряда методов, которые обеспечивали бы, во-первых, достаточно быструю сходимость, и, во-вторых, были бы достаточно универсальными. В качестве матриц систем линейных уравнений мы брали матрицы, возникающие при решении методом конечных элементов задачи моделирования напряженно - деформированного состояния пневматической шины. Такие матрицы имеют разреженную ленточную структуру. Решались системы с числом уравнений 30000, 50000, 70000 и 90000 на 2-х, 3-х и т.д. до 12 процессорах. Для вычислений использовалась кластерная система МВС 1000М. Система МВС 1000М состоит из 384 двухпроцессорных модулей с процессорами Alpha 21264, объединенных сетью Myrinet 2000. Объем оперативной памяти на каждом модуле составляет 2 Гбайта. Исследовались следующие итерационные методы: Ричардсона, Чебышевского, сопряженных градиентов и его модификации в сочетании с предобуславливателем Якоби, блочным предобуславливателем Якоби и аддитивным предобуславливателем Шварца. В программе, решающей систему линейных уравнений, используется MPI в качестве платформы для коммуникаций и библиотека PETSc (http://www.mcs.anl.gov/petsc).

В результате экспериментов можно сделать следующие выводы. Наиболее надежным сочетанием предобуславливателя и итерационного метода оказалось сочетание стабилизированного метода бисопряженных градиентов (BiCGSTAB) и самого простого предобуславливателя Якоби. При таком сочетании итерации сходятся для всех наборов процессоров от 2-х до 12-ти и для матриц размером 30000, 50000 и 70000. Правда, для матрицы размером 90000 лучшим оказалось сочетание метода квазиминимальных невязок и блочного предобуславливателя Якоби. Основной вывод, который можно сделать из проведенных экспериментов, состоит в том, что для достаточно большого числа процессоров время решения системы для различных методов примерно одинаково, и, следовательно, надежность метода является наиболее важным показателем эффективности метода.

Устойчивость термокапиллярной конвекции при колебании свободной поверхности под действием вибрации и рост кристаллов методом плавающей зоны в этих условиях

Г.А. Долгих, А.И. Феонычев (Москва)

Для реализации потенциальных возможностей выращивания кристаллов методом плавающей зоны в условиях микротяжести необходимо решить несколько серьезных проблем, одной из которых является воздействие вибрации. Численное исследование воздействия осевой вибрации на жидкий столбик показало [1], что колебания свободной поверхности имеют специфические особенности, не описываемые существующими аналитическими решениями: образование нескольких стоячих волн, колебания свободной поверхности на частотах, меньших приложенной частоты вибрации. В работе [2] представлены методические расчеты термокапиллярного течения и переноса примеси, не связанные с реальными вибрациями.

В настоящей работе представлены результаты расчета амплитуд и частот колебаний свободной поверхности жидкого столбика, полученные с помощью нового аналитического решения, учитывающего особенности, обнаруженные в численных расчетах. Установлена связь амплитуд и частот стоячих волн на свободной поверхности с параметрами вибрации и физическими свойствами жидкости. Решение проверено сравнением с данными численных расчетов и эксперимента, проведенного по программе TEXUS.

Проведен нелинейный численный анализ устойчивости термокапиллярной конвекции при различных значениях числа Марангони, амплитуд и частот вибрации. Показано, что при заданном вибрационном ускорении существуют предельная частота, выше которой вибрация не влияет на термокапиллярное течение. Определены пороговые частоты, за которыми происходит резкое нарушение устойчивости термокапиллярного течения и переход к осциллирующему режиму. Между этими частотами заключена зона, где структура термокапиллярного течения изменяется, но колебания скоростей и температуры невелики, а перенос примеси на границе кристаллизации меняется незначительно.

Обсуждаются возможности использования жидкого столбика для калибровки микроакселерометров в области низких частот.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС (проект INTAS-2000-0617).

1. Feonychev A.I. et al. NASA Conference Publication 3338, 493-498 (1996).

2. Феонычев А.И., Долгих Г.А. Космические исследования, том 39, № 4, с. 400-406 (2001).

Использование пакета ADAMS в динамических расчетах механических систем

И.В. Домбровский, Н.А. Шевелев (Пермь)

Программный комплекс ADAMS позволяет создавать и проводить всесторонний анализ виртуальных компьютерных моделей разрабатываемого изделия на ранних стадиях проектирования, проводить проверочные расчеты, а также анализировать работу уже спроектированных изделий. Комплекс имеет модульную структуру.

Модуль ADAMS/View предназначен для создания, тестирования и оптимизации модели. Создание модели подразумевает описание всех ее характеристик: геометрических размеров, физических свойств, способов соединения подвижных и неподвижных частей, задание действующих сил и моментов, начального положения элементов модели и их скоростей. Этап тестирования модели включает в себя моделирование поведения частей модели под действием приложенных сил и заданных движений и выявления критических параметров, наиболее сильно влияющих на эффективность работы модели в целом. Оптимизация модели заключается в определении таких значений критических параметров модели, при которых ее работа будет наиболее эффективной.

Виртуальные модели, которые отображают реальные механизмы, в ADAMS конструируются из отдельных объектов. В пакете ADAMS существуют различные типы простейших тел, более сложные объекты создаются их комбинацией.

После того, как все части конструкции созданы, необходимо указать, каким способом они связаны. Все соединения в ADAMS по умолчанию являются идеальными, но в них можно добавить трение.

Благодаря богатому математическому аппарату, встроенному в ADAMS, практически все характеристики создаваемой модели (геометрические, кинематические, массовые и др.) могут быть параметризированы при помощи редактора функций и таблиц. Созданная модель передается на решение в модуль ADAMS/Solver, который конвертирует построенную в ADAMS/View модель в уравнения движения и разрешает полученную систему.

Модуль ADAMS/Postprocessor позволяет отображать в виде графиков и таблиц требуемые характеристики (скорости, ускорения, перемещения, силы реакций, моменты и др.) для любого элемента механической системы, в любой ее точке, как относительно глобальной системы координат, так и в локальных системах.

В пакете ADAMS был решен ряд задач по кинематическому и динамическому анализу элементов систем специального назначения. Полученные решения показали высокую эффективность данного программного комплекса.

Связанная вязко-упругая модель пространственного деформирования позвоночника человека и его сегментов при сочетанных нагрузках

А.Н. Дондоков, А.А. Оксогоев (Улан-Удэ)

Позвоночник человека, как биомеханическая система, обладает рядом принципиальных особенностей, обусловленных наличием “обратных связей”, иерархией функционирования и многостадийностью адаптивной перестройки в процессе деформирования его элементов при эксплуатационных нагрузках, в частности, сочетанного характера.

Механизм реакции позвоночника на внешние воздействия рассматривается в рамках основных принципов синергетики [1]: подчинения и минимизации производства энтропии, из которых, как следствие, вытекают:

- взаимосвязь между структурой и свойствами в локальной зоне самоорганизации структуры;

- взаимосвязь между временами обострения в ходе процесса режима с обострением;

- упорядоченность процесса, отвечающая определенным сценариям перехода в состояния “устойчивость ⊔ неустойчивость ⊔ устойчивость”.

Математическая модель сегмента позвоночника представляет собой многоуровневую пространственную динамическую модель [2], характеризуемую структурными особенностями поведения концевой и замыкательной гиалиновой пластинок, спонгиозной части, фиброзного кольца и пульпозного ядра межпозвоночного диска. Из численного эксперимента на базе конечно-элементной процедуры выявлено, что наибольшей повреждаемостью характеризуются области талии позвонка и пульпозного ядра, подтверждаемой клинической практикой.

В расширение модели [2] введена вязко-упругая составляющая реакции межпозвоночного диска посредством трехпараметрического ядра Ржаницына-Колтунова.

1. В.С. Иванова, А.А. Оксогоев, А.Н. Дондоков. Алгоритм самоорганизации устойчивых структур в режиме самоуправления и управления в сплавах с обратной связью. / В кн.: “Моделирование процессов в синергетическах системах”. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002.- С. 317-320.

2. А.А. Оксогоев, А.Н. Дондоков. Синергетическое поведение позвоночника человека и его сегментов при ударных перегрузках. / В кн.: “Математическое моделирование процессов в синергетическах системах”. – Томск: Изд-во ТГУ, 1999.- С. 229-232.

Влияние запаздывания в системе на динамику фазовых переходов в конденсированных средах вблизи положения равновесия

И.Н. Доценко (Уфа)

Изучение фазовых переходов в различных системах – одно из важных направлений развития современной физики. Построение полной, адекватной, надёжной и логически непротиворечивой теории этого сложного явления, связанное с необходимостью преодоления большого числа трудностей, всё ещё далеко до своего завершения. Важнейшим механизмом фазового превращения в конденсированных средах является, как известно, развитие флуктуаций в системе, механизм взаимодействия которых был впервые исследован в рамках теории самосогласованного поля (ССП) [1]. Однако, если статическое взаимодействие флуктуаций вблизи критической точки для различных систем в целом идентично, то динамическую картину фазового перехода существенно осложняет необходимость учёта взаимодействий флуктуаций также и с другими термическими возбуждениями в системе. Математическая модель динамических явлений в критической области основана на использовании релаксационного уравнения [2], в котором эффективный гамильтониан системы берётся обычно в форме Ландау [1,2].

Рассматривается задача в традиционной постановке [2], в которой вместо зависимости $\delta\varphi(\vec{x},t)$, где φ - параметр порядка, образующий скалярное поле упорядочения в пространстве $(\vec{x},t)$, предполагается зависимость $\delta\varphi(\vec{x},t-\Delta t_i)$, в которой $\Delta t_i \geq 0 (i=1,2,...n)$ - характерные времена запаздывания в системе. Иными словами, скорость изменения φ в момент времени *t* зависит не только от состояния системы в этот момент, но и от её состояния в предшествующие ему моменты $t-\Delta t_i$. Эти времена запаздывания могут быть как постоянными (некоторые из них и нулевыми), так и переменными величинами, они могут сложным образом зависеть не только от времени *t*, но и от самой функции $\varphi(\vec{x},t)$ и даже от её частных производных. Задача исследовалась в предположении малых постоянных времён запаздывания. Выявлено влияние запаздывания на динамические эффекты в системе в метастабильной фазе вблизи границы устойчивости.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, часть 1.- М.: 1976.

2. Паташинский А.З., Шумило Б.И. Теория релаксации метастабильных состояний // ЖЭТФ. – 1979.- Т. 77, вып. 4 (10).- С. 1417-1431.

Расчет течений двух жидкостей между цилиндрическими поверхностями

И.С. Дружинина, А.А. Лежнева, И.И. Першакова, Н.В. Шакиров (Пермь)

В процессах переработки полимеров и обработки металлов давлением часто встречаются ползущие течения в медленно сходящихся узких каналах. Эти течения обычно аппроксимируются хорошо известным “смазочным” приближением.

Технологические схемы и картины течения смазки в волочильном инструменте и полимера в кабельных и листовых головках во многом совпадают. В результате увлекающего действия движущейся проволоки и гидростатического давления среда течет через кольцевое пространство и образует на проволоке покрытие. При нанесении полимерного покрытия на движущееся изделие возможны схемы течения, при которых градиент давления может быть как отрицательным, так и положительным. Течение с отрицательным градиентом давления реализуется в процессах соэкструзии и транспортировке жидких веществ по трубам.

Рассмотрим стратифицированное течение двух несжимаемых жидкостей, которое возникает в зазоре между движущейся с постоянной скоростью круглой проволокой и цилиндрической трубкой. Полагаем, что жидкость прилипает к поверхностям инструмента и изделия. Скорость в слое, прилегающей к поверхности проволоки, равняется скорости движущейся проволоки. На поверхности цилиндра она равняется нулю.

Для случая течения линейно-вязких жидкостей в работе находятся скорости и расходы каждой из жидкостей, исследуются влияние их взаимного месторасположения, геометрических размеров каналов и реологических характеристик на картину течения. Для конкретных отношений вязкостей рассчитывается положение границы раздела слоев, обеспечивающее минимальную диссипацию в канале. Анализ изолиний суммарного расхода жидкостей от безразмерного градиента давления и безразмерного радиуса разделения слоев показал, что при малых градиентах давления кривые имеют экстремальный характер. Т.е. путем оптимального выбора местоположения границы раздела можно добиться максимального расхода.

В случае течения нелинейно-вязких жидкостей приведены численные результаты для ряда конкретных частных случаев, в частности, когда один из слоев линейно-вязкий, а второй – нелинейно-вязкий. Проанализировано влияние параметра нелинейности на картину течения и величину расхода.

Захваченные волны над наклонной прибрежной отмелью при наличии вращения

В.А. Дубинина, А.А. Куркин, О.Е. Полухина (Н. Новгород)

В последние годы весьма интенсивно изучаются вопросы возникновения аномальных волн (порядка 10 – 30 м) на различных акваториях Мирового океана. Особенностью таких волн является неожиданность их появления и исчезновения на фоне достаточно спокойного моря, что служит причиной катастрофических ситуаций, приносящих тяжелый материальный ущерб и вызывающих гибель людей. Большой статистический материал наблюдений аномально высоких волн накапливается в настоящее время у побережья Южной Африки, в Мексиканском заливе, а также шельфах европейских морей. В частности, только за период 1968 – 1994 гг. было потеряно 22 супертанкера и погибло 525 человек [1, 2]. Статистика также свидетельствует, что одна аномальная волна, превосходящая по своим параметрам в 3 раза обычную, приходится на 1175 волн, а четырехкратное превышение встречается у одной волны из 300 000 нормальных. Но статистически невозможно предсказать появление волны-убийцы.

В данной работе исследуется процесс формирования аномальных захваченных волн над наклонной прибрежной отмелью при наличии вращения. Показано, что суперпозиция захваченных волн представляет собой узкий импульс, вся энергия которого сосредоточена около берега и не передается в открытый океан. Получена зависимость максимальной амплитуды волны со временем, показывающая, что значительное усиление происходит за короткое время. Данный эффект демонстрируется для трехмерных захваченных волн.

1. Lawton G. Monsters of the deep // New Scientist. 2001. № 2297. P. 28 – 32.

2. Sand S.E., Hansen N.E., Klinting P., Gudmestad O.T., Sterndorf M.J. Freak wave kinematics // Water Waves Kinematics / eds. A. Torum and O.T. Gudmestad. – Kluwer: Netherlands, 1990. P. 535 – 549.

Оптимальное управление в некоторых задачах гидродинамики

И.В. Дубовиченко, А.А. Олейник, Ел.В. Шкляева (Пермь)

В работе рассматриваются некоторые задачи гидродинамики, сводящиеся к задачам оптимального управления. Для задач со свободной границей предлагается следующий подход к нахождению неизвестной области и состояния системы в этой области: поставленная задача сводится к задаче оптимального управления областью, которая, в свою очередь, сводится к задаче граничного или распределенного управления (управление является жестким) в уже известной области, но на абстрактном и малоизученном классе функций. Трудность поставленной задачи состоит и в том, что целевая функция полученной задачи граничного управления зависит от границы неизвестной области. В работе доказано существование оптимального управления в достаточно широком классе областей с ограниченным периметром, при котором на свободной поверхности выполняются некоторые условия. В работе изучается задача определения состояния атмосферы по данным в конечном числе точек. Используя математическую модель атмосферы и методы оптимального управления, требуется определить состояние атмосферы между точками наблюдения. Задача сводится к задаче оптимального управления системой дифференциальных уравнений с частными производными. Состояние системы описывается классическими уравнениями гидродинамики – уравнениями Эйлера. Использование точечного наблюдения в задаче управления усложняет вопрос ее разрешимости. Еще одной особенностью задачи является ее нелинейность, что не позволяет использовать при ее решении хорошо изученные методы. Рассматривается неизотермическое движение вязкой несжимаемой жидкости в двумерной области. Состояние системы описывается уравнениями Стокса. Требуется, управляя потоком тепла на части границы, получить в области распределение скорости, близкое к заданному. Сложность поставленной задачи состоит в том, что требуемый профиль скорости в общем случае не является решением исходной системы уравнений. Ставится задача нахождения аппроксимативного управления. Рассмотрено жесткое и граничное управление и распределенное наблюдение. Доказана теорема существования аппроксимативного управления, разработан численный алгоритм его нахождения и примеры реализации для конкретных течений. Получены, кроме того, достаточные условия точной управляемости.

В случае неизотермического течения вязкой сжимаемой жидкости, движение которой описывается системой уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска, управлением является профиль скорости на части границы, наблюдение – граничное. В работе получены необходимые условия оптимальности управления, которые используются для построения численного решения задачи.

Растворение цилиндрических капель бинарной смеси

И.В. Дубровских, К.Г. Костарев (Пермь)

Определение и учет взаимодействия различных механизмов тепломассобмена является одним из путей интенсификации технологических процессов, содержащих смешивание, экстракцию и растворение жидкостей.

В докладе изложены результаты экспериментального изучения взаимодействия диффузии, гравитационной и капиллярной конвекции, сопровождавших растворение в воде капель смеси хлорбензола и изопропилового спирта, представлявшего собой поверхностно-активное вещество (ПАВ) для двух предыдущих жидкостей. Исследование выполнено для капель в форме короткого широкого цилиндра, помещенного в зазор между двумя плоскопараллельными стеклами - ячейку интерферометра Физо. Боковая поверхность такой капли была свободна, а ее плоские торцы позволяли визуализировать возникавшие течения и распределения концентрации ПАВ в форме, допускавшей количественную обработку.

Особый интерес - применительно к условиям микрогравитации - представляет взаимовлияние концентрационно - капиллярной и концентрационно - гравитационной конвекции. Вклад последней в массообменные процессы в наземных условиях можно усилить или ослабить, меняя ориентацию цилиндрической капли в гравитационном поле. Используя это с целью полнее изучить взаимодействие указанных механизмов, процесс растворения был исследован как в вертикальной, так и в горизонтальной ячейке, где выполнялись условия максимального подавления гравитационной конвекции.

В ходе обеих серий опытов были визуализированы течения и поля концентрации внутри и вне капли. Определены и обсуждаются зависимости основных характеристик процесса растворения от времени, начальной концентрации ПАВ и ориентации ячейки.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ.

К обоснованию построения феноменологической стохастической модели реологического микродеформирования и разрушения материалов

С.А. Дудкин, В.П. Радченко (Самара)

Феноменологические теории, как правило, носят детерминированный характер и не учитывают разброс механических характеристик материала (деформация ползучести и пластичности, время разрушения и т.д.) по пространственно - временным координатам, который в реальных экспериментальных исследованиях составляет значительную величину. Поэтому возникает задача построения стохастических феноменологических моделей, основой которых являются соответствующие экспериментальные данные.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование локальных одномерных полей неупругих микродеформаций в процессе разрушения материала на примере сплава АД-1 при температуре 26ºС. Для выявления характера распределения остаточной неупругой деформации по длине одноосного образца на его боковой поверхности с помощью конусообразного индентора наносились контрольные лунки, отстоящие друг от друга на расстоянии ~ 2мм. В ходе проводимых испытаний измерение расстояний между контрольными лунками проводилось на большом инструментальном микроскопе, имеющим цену деления 1 мкм.

В ходе проведенных исследований были осуществлены следующие программы испытаний: 1) упругопластическое нагружение до разрушения ступенями по наколенной деформации 1-2 % на каждой ступени с последующей разгрузкой и замером локального поля пластических деформаций; 2) ступенчатое нагружение на ползучесть вплоть до разрушения при постоянном напряжении до значения накопленной деформации 1-2 % на каждой ступени с последующей разгрузкой и замером поля деформации ползучести по длине образца; 3) комбинированное нагружение с чередованием упругопластического деформирования и деформирования при постоянном напряжении во времени на ползучесть до значения накопленной деформации 1-2 % на каждой ступени нагружения с последующей разгрузкой и замером локального поля остаточных деформаций.

Экспериментальные исследования также были проведены на нескольких плоских образцах с концентраторами (круговые отверстия, боковые полукруглые выточки, V-образный концентратор). Проведен подробный корреляционный анализ полей микродеформации ползучести и пластичности. Предложены стохастические модели неупругого микро- и макродеформирования и разрушения материала. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Наблюдается соответствие данных расчета с экспериментальными данными.

Исследование структурных геометрических и физических полей в механике упругопластических композитов

Н.В. Евлампиева, А.А. Ташкинов (Пермь)

Изучаются случайные поля структурных модулей упругости, напряжений и деформаций в задачах о деформировании матричных композитов со сферическими и эллипсоидальными включениями.

Рассматривается упругопластическая краевая задача для структурно - неоднородных сред с учетом моментных функций модулей упругости. Решение задачи отыскивается в интегро-дифференциальных уравнениях методом функций Грина в полном корреляционном приближении. При вычислении моментов полей напряжений и деформаций используются аппроксимации моментных функций структурных модулей упругости второго и третьего порядков. Применяется метод статистического осреднения системы уравнений равновесия упругопластического изотропного композиционного материала.

Проводится исследование геометрии статистических однородных изотропных полей структурных модулей упругости. Рассматриваются различные типы синтезированных структур, для которых в численном эксперименте строятся моментные функции модулей упругости второго и третьего порядков. Установлены качественные различия в характере затухания моментных функций, построенных для структур со сферическими и эллипсоидальными включениями. Предлагается общее для структур с различным объемным содержанием выражение для аппроксимации моментных функций структурных модулей упругости.

Получены новые численные результаты о полях напряжений и деформаций пористого материала для разреженных структур при заданных условиях нагружения (например: чистый сдвиг и одноосное растяжение).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96488).

Механизм усиления каучуков наполнителями, как трибоупругий феномен

С.Е. Евлампиева, В.В. Мошев (Пермь)

Хотя эффект усиления каучука твердыми частицами известен уже около 100 лет и широко используется в промышленности, механизм этого процесса до сих пор остается неясным. Существующие гипотезы носят качественный характер и не защищены моделями, которые допускали хотя бы примерную количественную оценку этого эффекта. Одна из них рассматривает усиление как следствие особой связи каучука с поверхностью частиц, которая допускает возможность заторможенного скольжения макромолекул, адсорбированных на поверхности частиц, когда к образцу приложена внешняя сила [1].

Нами предпринята попытка математизировать эту гипотезу. Предлагаемая модель структурной ячейки представляет пружину, воспроизводящую механическое поведение реальных эластомерных молекул, и две подложки, на которых она расположена, представляющие поверхность соседних частиц. Упругое сопротивление пружины специфично. Ее модуль зависит от начальной длины и растет нелинейно с увеличением деформации. Пружина удерживается на поверхности подложек адсорбционными силами. Приложение внешней силы приводит к соскальзыванию пружины в промежуток между подложками, сохраняя ее целостность. Сила адсорбции, тормозящая скольжение, представляется при этом некоторой эффективной силой трения.

Построенное на этой основе математическое описание воспроизводит эффект усиления, наблюдаемый в опытах – 10-20-кратное усиление модуля. Численное экспериментирование показывает, что модель объясняет и ряд других особенностей механического поведения резин, которые до настоящего времени также не находили ясного объяснения. Так, например, гистерезисные потери при циклических испытаниях резин нельзя понимать как накопление некоторой микроскопической поврежденности. В действительности поврежденность, как необратимое изменение свойств, в материале не накапливается. Происходит только перестройка внутренней структуры, которая после разгрузки удерживается в материале силами адсорбции. Первичная структура может быть восстановлена простым прогревом образцов, что подтверждается опытными данными.

Таким образом, трибоупругий феномен представляется важнейшим, если не основным, участником формирования эффекта усиления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96492).

1. А.П. Александров, Ю.С. Лазуркин. Прочность аморфных и кристаллизующихся каучукоподобных полимеров // ДАН. — 1944. — Т. 45, № 7. — С. 308-311.

Моделирование упругопластической деформации градиентных материалов и материалов с покрытиями

Е.П. Евтушенко, П.В. Макаров (Томск)

В настоящее время используется и изучается множество способов и технологий нанесения покрытий для усовершенствования и модификации свойств базового материала. При этом проводятся исследования как оптимальных способов получения покрытий, так и физико-механических свойств композиции в целом. Для многих технологических процессов формирования покрытия или поверхностной упрочненной зоны характерно возникновение на границе раздела материал – покрытие так называемой градиентной зоны. В этой зоне в результате диффузии или других технологических факторов наблюдается перемешивание исходных материалов и формирование градиента локальных механических свойств композиции. С целью изучения и предсказания свойств получаемых конструкционных материалов проводятся различные эксперименты и теоретические исследования.

В представляемой работе предпринята попытка моделирования механического поведения материалов с нанесенным покрытием с позиций мезомеханики. В работе проводится двухмерное численное моделирование упругопластической деформации материала с нанесенным покрытием при различных способах нагружения. В расчетах рассматривается мезообъем композиции в приграничной с покрытием области, в которой учитывается наличие градиентного подслоя. Проводится оценка прочностных ресурсов материала покрытия при различных внешних воздействиях.

При моделировании деформации композитов и сложных составных материалов особое внимание уделяется учету приграничного слоя и градиентной зоны. Исследуется также влияние геометрических особенностей на характер напряженно - деформированного состояния композита.

К построению новых алгоритмов минимизации функции невязки по склону

А.В. Елесин (Казань)

В работе рассматривается задача идентификации коэффициента фильтрации в случае трехмерного напорного анизотропного пласта. Коэффициент фильтрации определяется в рамках общепринятой постановки [1] в процессе минимизации функции невязки (сумма квадратов разности между вычисленными и измеренными значениями напоров в наблюдательных точках), которая при большом количестве идентифицируемых параметров является сильно овражной функцией. Предлагается новый алгоритм минимизации подобных функций. В основе алгоритма лежит идея минимизации функции по склону без предварительного спуска на дно оврага. Минимизация проводится в системе координат, получаемой SVD разложением [2].

Минимизация по склону достигается за счет торможения спуска в направлениях, соответствующих большим сингулярным числам. Торможение в направлении, соответствующем максимальному сингулярному числу, проводится для улучшения минимизации максимальной невязки в сравнении со всей функцией невязки. При построении данного алгоритма используются запасы чувствительности [3,4], которые характеризуют потенциальную возможность параметров к минимизации функции невязки.

В общем случае задача идентификации коэффициента фильтрации является некорректно поставленной. В целях улучшения устойчивости решения задачи к погрешностям в исходных данных (замеры напора) предлагается новый критерий остановки процесса минимизации, основанный на свойствах запасов чувствительности вблизи точки минимума функции невязки.

1. Sun N.-Z. Inverse problems in groundwater modeling. // Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1994.

2. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. // М.: Мир, 1999. 548 с.

3. Мазуров П.А., Елесин А.В., Габидуллина А.Н., Кадырова А.Ш. Определение параметров водоносных пластов с использованием анализа чувствительности. // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. С. 462-471

4. Mazurov P.A., Elesin A.V., Gabidullina A.N., Kadyirova A.Sh. Use of minimization along the slope for estimation of aqiufer parameters. // Proceedings of the ModelCARE'2002: Calibration and reliability in groudwater modelling. Prague, 2002. Vol. 1, P. 278-281.

Исследование эрозионного следа на поверхности полимеров

В.В. Елтышев, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин (Пермь)

В настоящее время широко используется в различных областях промышленности водоструйная технология, которая основана на обработке материала струей воды высокого давления. Данная технология обладает такими свойствами как высокая скорость обработки, отсутствие притупления режущего инструмента, невозникновение термических напряжений в обрабатываемом материале, многонаправленность и пожаробезопасность процесса. При этом возникают вопросы в исследовании микро- и макромеханики деформирования и разрушения различных материалов конструкции, обработанных по данной технологии.

Одним из этапов теоретического исследования проникновения высоконапорной струи в обрабатываемый материал конструкции является исследование эрозионного следа, полученного воздействием струи воды высокого давления. В качестве объекта исследования выступали образцы из полиметилметаакрилата (ПММА), которые были подвержены воздействию струи воды высокого давления. Эрозионный след на данных образцах представляет собой сложную микроструктуру. Такая микроструктура описывалась с использованием статистических методов обработки и математического аппарата теории случайных функций. Были построены моментные функции для описания микроструктуры эрозионных следов. Результаты статистической обработки показали, что случайные функции, описывающие микроструктуру эрозионных следов, можно считать статистически-однородными и эргодическими.

Разработана методика для идентификации отсканированного изображения эрозионного следа для дальнейшего построения полного профиля поверхности. Оценены параметры шероховатости и их числовые значения, регламентированные ГОСТ 2789-73. Выявлена зависимость между параметрами шероховатости и параметрами обработки образцов из ПММА струей воды высокого давления.

Работа выполнена по проекту INTAS (№00-0268).

Влияние фрактальных агрегатов на магнитную проницаемость феррожидкости

Е.А. Елфимова (Екатеринбург)

Свойства магнитных жидкостей во многом зависят от присутствия агрегатов феррочастиц, а также от типа этих образований. В коллоидных системах могут возникать микрокапельные, цепочечные и рыхлые квазисферические агрегаты [1], известные как “фрактальные кластеры” [2]. Определение магнитной проницаемости агрегированной феррожидкости с фрактальными вкраплениями является главной целью работы. Потенциал магнитного поля находился, исходя из следующих предположений: концентрация фрактальных кластеров в магнитной жидкости достаточно мала; магнитное взаимодействие между частицами кластера очень слабое. В соответствии с внутренней структурой фрактального агрегата, решение поставленной задачи определялось в 3-х зонах: внутри плотного однородного ядра кластера; внутри слоя, где концентрация агрегированных частиц кластера меняется по степенному закону, что является главной особенностью фрактальных структур [2] и вне фрактального агрегата. В результате получена аналитическая зависимость потенциала магнитного поля от расстояния до формального центра кластера, которая хорошо согласуется с численным решением данной задачи. При определении эффективной магнитной проницаемости феррожидкости с фрактальными вкраплениями учитывалось уравнение баланса: чем больше концентрация кластеров в магнитной жидкости, тем меньше свободных частиц во всей системе. Обнаружены следующие эффекты: средняя магнитная проницаемость неагрегированной феррожидкости выше, чем магнитной жидкости с фрактальными структурами. Разница составляет 0-1,5% (объемная концентрация фрактальных кластеров изменяется от 0 до 0,06). При рассмотрении другой предельной ситуации, когда в коллоиде нет свободных частиц, а присутствуют только капельные агрегаты того же размера, что и фрактальные кластеры, обнаружено: магнитная проницаемость коллоидной среды с каплями ниже, чем магнитной жидкости с фрактальными вкраплениями. Отличие составляет 3-5% (чем выше объемная концентрация фрактальных кластеров в системе, тем меньше разница). Кроме того, исследована эффективная магнитная проницаемость феррожидкости в зависимости от размера образовавшихся в ней фрактальных агрегатов. Эта характеристика меньше средней магнитной проницаемости феррожидкости с микрокапельными вкраплениями при одинаковой концентрации агрегатов в коллоидной системе.

Исследования проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ-Урал № 01-02-96430, № 02-15-99308 м и № 03-02-16115 а), а также гранта CRDF № REC-005.

1. Buzmakov V.M.,Pshenichnikov A.F.,J.Colloid Interface Science/ 1996. V. 182. P.63

2. Ivanov A.O., Zubarev A.Yu. Phys.Rev.E 2001.V64. N 4. P. 041403-1-4.

Основные положения прочностной теории напряженного состояния

Ю.А. Ельцов (Ижевск)

В начале прошлого столетия в научных исследованиях и инженерной практике определения прочности материалов утвердились геометрические принципы построения кругов напряжений и огибающей предельной линии сдвига в режиме сжатия и растяжения, предложенных О. Мором, Л. Прантлем и А. Леоном. Это было крупным достижением того времени, несмотря на некоторые неясности и противоречия. Для построения кругов напряжений и огибающей круги Мора линии, начало координат выбиралось произвольно, вне связи с начальными напряжениями. Сжимающие (нормальные) напряжения откладывались с одной стороны условного начала координат, а растягивающие (тоже нормальные), - с другой, что приводит к искривлению огибающей и изменению угла ее наклона (угла внутреннего трения φ) к оси нормальных напряжений σ.

В известных теориях прочности исходят из следующих основополагающих гипотез: сплошности среды и равенства нулю начальных (внутренних) напряжений. Исключение внутренних напряжений из рассмотрения не дает полного представления о действительном напряженном состоянии и динамике его развития.

В прочностной теории напряженного состояния (ПТНС) основным условием является получение простых прямолинейных зависимостей, согласующихся с экспериментальными. Это достигается новыми приемами геометрических построений предельной линии сдвига и кругов напряжений.

В разработке теории ПТСН все компоненты напряжений (в режимах сжатия или растяжения, в упругой или предельной стадиях силового воздействия) функционально зависят от параметров прочности: модуля трения tg φ и сцепления связности *c,* характеризующего внутреннее напряжение структурных связей.

Из основных положений ПТНС устанавливаются новые функциональные связи между сопротивлениями растяжения σ_p и односложного сжатия σ_c, но с учетом сцепления связности *c*. Найденная функциональная связь $\sigma_p=f(\sigma_c; c)$ по сравнению с известной $\sigma_p=f(\sigma_c)$ оказалась наиболее совпадающей с опытными значениями σ_p, и это при значениях параметров прочности *c* и φ, полученных по старым методикам, где модуль трения tg φ менялся в пределах от 0 до ∞, тогда как по ПТНС он не может превышать единицы.

Важным достижением ПТНС, подкрепленным опытными данными, является положение о том, что касательные напряжения составляют половину от максимальных нормальных напряжений. Известное же их равенство полуразности нормальных напряжений ведет к нелинейности предельной линии сдвига и затрудняет установление связей между рассматриваемыми параметрами напряженного состояния.

О конвективной неустойчивости механического равновесия плоского слоя вязкоупругой микрополярной жидкости

В.А. Еремеев, Д.А. Сухов (Ростов-на-Дону)

Модель вязкой микрополярной жидкости впервые была предложена в [1,2] и впоследствии нашла значительные приложения [3] для описания течения суспензий, магнитных жидкостей, взвесей, жидкокристаллических сред. Кроме того, модель микрополярной жидкости получила развитие применительно к задачам трибологии для описания течения в узких каналах [4]. В рамках модели микрополярной жидкости каждая точка среды обладает степенями свободы абсолютно твердого тела, так что, например, скорость и скорость вращения частиц являются независимыми величинами. Кроме того, наряду с обычными напряжениями присутствуют и моментные напряжения. В [5,6] получено обобщение вязкой микрополярной жидкости на случай жидкой среды с памятью общего вида (вязкоупругой микрополярной жидкости). Характерной особенностью вязкоупругой микрополярной жидкости является ее способность выдерживать в состоянии равновесия касательные напряжения и моменты подобно жидким кристаллам.

В данной работе рассмотрена задача о конвективной неустойчивости равновесия бесконечного горизонтального, плоского слоя вязкоупругой микрополярной жидкости. Переход к конвективному движению (потеря устойчивости) рассматривается аналогично случаю вязкой жидкости [7,8] в приближении Обербека-Буссинеска. Показано, что учет эффектов вязкоупругости приводит к повышению критического числа Рэлея по сравнению со случаями ньютоновской и вязкой микрополярной жидкости, т.е. оказывает стабилизирующее действие при переходе к конвективному течению.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-00529) и КЦФЕ при СПбГУ (грант № Е00-4.0-185).

1. Аэро Э.Л., Булыгин А.Н., Кувшинский Е.В. // ПММ. 1965. Т.29. N2. С.297-308.

2. Eringen A.C. // J. Math. and Mech. 1966. V. 16. N1. P.1-18.

3. Мигун Н.П., Прохоренко П.П. Гидродинамика и теплообмен градиентных течений микроструктурной жидкости. Минск: Наука и техника, 1984. 264с.

4. Бессонов Н.М., Аэро Э.Л. // Трение и износ. 1993. Т.14. N1. С. 107-111.

5. Зубов Л.М., Еремеев В.А. // Доклады РАН. 1996 Т.351. № 4. С. 472-475.

6. Еремеев В.А., Зубов Л.М. // ПММ.1999. Т.64. N 5. С. 801-815.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.

8. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости М.: Наука, 1972. 392 с.

Нелинейная теория упругих оболочек, учитывающая поперечные сдвиги и обжатие

А.В. Ермоленко, Е.И. Михайловский (Сыктывкар)

Используется квадратичная аппроксимация вектора перемещений по толщине оболочки, коэффициенты которой определяются из некоторых дополнительных условий. В отличие от аналогичной теории К.Ф. Черныха, предложенной в работе [1], учитываются вариации названных коэффициентов. Поперечные сдвиги учитываются линейно относительно актуальной конфигурации.

Уравнения упругости для жесткогибких оболочек (т.е. изготовленных из жесткого сжимаемого материала и допускающих конечные перемещения за счет конечных углов поворота при относительно малых деформациях) строятся с использованием упругого потенциала стандартного материала 2-го порядка. Соответственно для мягкогибких оболочек (изготовленных из мягкого несжимаемого материала, допускающего конечные упругие деформации) используется упругий потенциал неогуковского материала. Полевые и граничные уравнения выводятся из вариационного уравнения Лагранжа. Установлен критерий возможности применения теории жесткогибких оболочек для расчета мягкогибких оболочек.

Показано, что при формулировке граничных условий в терминах геометрических величин краевая задача нелинейной теории оболочек, вообще говоря, некорректна.

Для частного случая нелинейной теории оболочек типа Маргера-Тимошенко-Нагди предложен так называемый полудеформационный вариант граничных величин [2], при использовании которого основные полевые и граничные уравнения образуют замкнутую систему.

1. Черных К.Ф. Нелинейная теория изотропных упругих тонких оболочек // Изв. АН СССР. МТТ. 1980. №2. С.148-159.

2. Михайловский Е.И., Ермоленко А.В. Полудеформационный вариант граничных условий в нелинейной теории пологих оболочек // В сб.: Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела. СПб.: СПбГУ, 2000. Вып. 3. С. 60-76.

Предельные соотношения для функции, представленной формулой Кирхгоффа, и ее частных производных и их приложения

М.Т. Жапаров, Ш.Д. Шамгунов (Бишкек)

Как известно, многие задачи гидрогазодинамики и динамической теории упругости можно свести к рассмотрению волнового уравнения или системы волновых уравнений при определенных начальных и граничных условиях. Любое же решение волнового уравнения можно представить формулой Кирхгоффа – поверхностным интегралом, в подинтегральное выражение которого входят значения функции – решения волнового уравнения - и ее первых производных. При этом предполагается, что точка, для которой вычисляется интеграл, является внутренней для области, ограниченной поверхностью, по которой распространен интеграл. Характерным для формулы Кирхгофа является запаздывание – значения функции и ее производных в подинтегральном выражении относятся не к данному моменту, а к предшествующим моментам времени.

В граничные условия, в зависимости от характера задачи, могут входить значения функции – решения волнового уравнения - и ее частных производных. Поэтому для решения упомянутых выше прикладных задач предлагаемым методом необходимо установить выражения, которыми представляются пределы указанных значений, вычисленных для точки, расположенной вне поверхности, по которой распространен интеграл, представляющий формулу Кирхгоффа, когда указанная точка стремится к точке этой поверхности.

Авторами установлены указанные предельные соотношения. Подстановка их в граничные условия конкретных задач приводят к системам интегро-дифференциальных уравнений относительно значений искомых функций и их производных на поверхности, вдоль которой распространены интегралы, представляющие формулу Кирхгоффа. Эти уравнения можно решить численным методом, используя отмеченный выше фактор запаздывания.

Усреднение свойств материалов в механике неоднородных сред

Н.В. Жданов, Н.М. Комарцов (Бишкек)

Знание физико-механических свойств является основой для суждения о применении конструкционных материалов в различных областях науки и техники. Если в качестве первичного признака материала принять внутреннее строение, то свойства материала (и не только механические) могут быть определены как вторичные, зависящие от структуры.

Металлы и сплавы представляют собой поликристаллические агрегаты, состоящие из большого количества структурных элементов, ориентированных случайным образом. В элементах – зернах имеются дефекты структуры, влияющие на макроскопические свойства твердых тел. Природа таких дефектов изучена недостаточно, не изучены и статистические закономерности их распределения, поэтому описать и указать свойства, зависящие от дефектов структуры, невозможно. В механике деформируемого твердого тела реальное вещество представляется сплошной средой с усредненными по, так называемому, представительному объему свойствами материала. Статистически однородный и изотропный объем должен содержать значительное число микрочастиц (дефектов), и свойства материала определяются, как эффективные свойства соответствующего характерного объема, не зависящие от геометрических размеров образцов. Свойства устанавливают в макроэкспериментах на образцах из исследуемого материала при конечных деформациях и приписывают точкам среды. Размеры характерного объема важны при моделировании сред, оценке применимости различных теорий, экспериментальных исследованиях, в теории измерений. Базой для установления свойств служит статистическая термодинамика, в которой в зависимости от гипотез о пребывании дефектов в определённом квантовом состоянии, принимаются различные функции распределения. Так распределение Гиббса хорошо ложится в представления механики континуума и неприменимо к дискретным средам. При изучении свойств материалов естественно принять равномерное распределение вероятностей, согласующееся с определением измерительной точки на некоторой базе. Такое распределение позволяет сформулировать дискретную модель сплошной среды с элементами - “шарами”. Размеры представительного объема в деформированном состоянии – “эллипсоида”, находятся из решения обратной статистической задачи. Зная качественно решение по определению напряженного состояния в шейке растягиваемого образца, по экспериментально найденному среднему напряжению при квазиравномерной деформации определяется функция осевого напряжения по сечению, и с использованием метода интегрирования Монте-Карло находятся размеры представительного объема.

Предлагаемый метод имеет несложную вычислительную процедуру, дает заслуживающие доверие результаты при выбранном уровне надежности.

Конечноэлементная реализация модального разложения

В.И. Желтков, Д.А. Кашулин, Д.В. Комолов (Тула)

Рассматривается вариант конечноэлементного анализа динамических задач для линейно-вязкоупругих тел с использованием модального разложения. Основой метода является построение динамического паспорта конструкции, т.е. определение форм свободных колебаний и соответствующих им комплексных частот. Решение конкретных задач строится в форме разложения по этому базису. Приводятся расчетные формулы, ориентированные на метод конечных элементов, включающие в себя только внешние нагрузки и начальные условия. Рассматриваются возможности приведения разрешающей системы обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений к диагональной форме.

Формулируется рациональный сценарий решения динамических задач. Отмечается возможность использования известных МКЭ-комплексов, например, ANSYS или аналогичных, для определения форм свободных колебаний. Формулируются рекомендации по разработке программ, отражающих специфику вязкоупругих тел - определение комплексных корней характеристического уравнения, реализацию аналитических расчетных формул.

Приводятся результаты решения некоторых практически важных задач - о свободных и вынужденных колебаниях вязкоупругих пластинок, о колебаниях массивных цилиндрических тел с каналом сложной формы.

Модернизация процесса получения изделий из полимерных композиционных материалов для литья по выплавляемым моделям

С.Г. Жилин, И.Г. Сапченко (Комсомольск-на-Амуре)

На основании проведенных исследований технологического процесса литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) установлено, что основной причиной брака оболочковых форм (ОФ) и получаемых отливок являются свойства воскообразных выплавляемых моделей (ВМ) и технология их изготовления. Определено, что основным технологическим свойством моделей является термостабильность.

Разработан принципиально новый подход к изготовлению ВМ с высокой термостабильностью, позволяющий сократить брак в ЛВМ до 90 %.

При реализации разработанного способа изготавливаемые из полимерной композиции модели имеют рассредоточенную мелкодисперсную открытую пористость по всему объему в пределах 3-20 %. Это позволяет упразднить ранее имеющие место дефекты моделей по недоливам, поверхностным газовым раковинам, волнистости и складкам, утяжинам, устранить облой по поверхности разъема пресс-формы. Модели, получаемые по разработанной технологии, обладают высокой размерной и геометрической точностью на всем временном интервале хранения. Чистота поверхности, при соответствующем качестве изготовления пресс-формы, характеризуется зеркальным блеском. Заложенный принцип изготовления пористых моделей из полимерных композиций позволяет равномерно распределить внутренние напряжения по всему объему последних, что обусловливает их абсолютную инертность к перепадам температур, имеющих место при формировании керамической оболочки. Последнее позволяет упразднить растрескивание ОФ. Поверхность экспериментальных моделей влагопроницаемая и позволяет плавно регулировать процесс сушки формируемой ОФ; равномерно регулируя усадочные процессы, что позволяет повысить их прочность на 10-15 %.

Удаление экспериментальных пористых моделей сопровождается сокращением их размеров. При этом давление на ОФ устраняется. Предотвращается пропитывание полимерной массой ОФ (при осуществлении операции удаления моделей в горячей воде), что приводит к снижению их брака при прокаливании.

В совокупности отмеченные преимущества разработанного способа изготовления пористых удаляемых моделей из полимерной композиции снижают, а в некоторых случаях и упраздняют, брак отливок по поверхностным дефектам, неметаллическим включениям и нарушению размерной и геометрической точности, значительно понижая себестоимость выпускаемой продукции.

Рост дискообразной трещины в сплошном цилиндре неограниченной длины в условиях нестационарного нагрева

В.А. Жорник (Таганрог)

Рассматривается нестационарная задача термоупругости, в которой исследуется рост дискообразной трещины в сплошном цилиндре неограниченной длины с известной начальной температурой, заключенном в тонкую оболочку и нагреваемом путем теплообмена средой известной температуры. Кроме нагрева средой, в цилиндре действуют нестационарные источники теплоты заданной плотности, симметричные относительно оси и плоскости расположения трещины. Рассмотрение этих источников обусловлено выделением теплоты концом трещины при ее продвижении. В отношении оболочки рассматриваются два предельных случая: в одном из них [1] оболочка предполагается предельно жесткой со скользящей заделкой на контакте, а во втором – предельно мягкой. Кроме того, предполагается, что в оболочке температура распределена линейно. Окончательное решение задачи свелось к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно функции, которая определяет коэффициент интенсивности термоупругих напряжений (КИН). Решение этого интегрального уравнения в случае жесткой оболочки приведено методом последовательных приближений подробно в работе автора [2], а в случае мягкой оболочки - численным методом в [3]. Полученная зависимость КИН от времени и размера трещины при фиксированной интенсивности нагрева позволяет проанализировать поведение трещины. Этот анализ показывает, что в отличие от изотермического случая, когда дискообразная трещина растет неустойчиво, вплоть до разрушения цилиндра, при нагреве она перемещается сначала скачком, далее - устойчиво вслед за развитием во времени термоупругих напряжений и, наконец, останавливается, не выходя на его поверхность.

1.Zhornik A.I., Zhornik V.A., Kashitsyn L.P. Nonsteady problem of themoelasticity for a solid infinite cylinder ,with a ring-shaped crack ,enclosed in a thing shell // *Advanced computational methods in heat* transfer IV: *Proc.of the 4th Int. conf. eds. L.C.* Wrobel ,et al.(Udine,8-10 July 1996). Southampton,Boston: Comp. Mech. Publication, 1996 P.505-516

2. Жорник В.А. Стационарная задача термоупругости для сплошного неограниченного цилиндра с дискообразной трещиной // *Совр. пробл .мех .спл .среды: Труды III Международной конф.,* ред И.И.Ворович (Ростов-на-Дону, 7-9 окт.1997 г.).Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ,1997, т.1, С.148-153.

3 .Sneddon,I .N., Welch ,J.T., A note on the distribution of stress in a cylinder containing a penny-shaped crack // *Int. J. Eng. Sci., 1963,№* 1, P.411-419.

Обтекание трехмерного погружного датчика потоком вязкого, теплопроводного газа с крупными примесями

А.А. Завада, А.О. Могильников, Б.Т. Породнов (Екатеринбург)

В работе рассматривается математическая модель процесса обтекания трехмерного погружного датчика дозвуковым потоком теплопроводного газа с крупными примесями во всех режимах течения (от свободномолекулярного до вязкого). Конструктивно погружной датчик давления можно представить себе следующим образом. Внешний корпус представляет собой конечный цилиндр с отверстиями различной формы (прорези по образующим цилиндра, а также круглые отверстия) для проникновения газа внутрь. Внутри внешнего цилиндра коаксиально расположен внутренний, стенки которого представляют собой сетку. На оси цилиндра натянута тонкая проволочка, нагретая до температуры, значительно большей температуры набегающего потока. Вся конструкция расположена в газовом потоке гексафторида урана. Тяжелые примеси, концентрация которых мала и не оказывает значительного влияния на динамику газа, представляют собой броуновские частицы с диаметром порядка нескольких нанометров. Они имеют возможность осаждаться с некоторой вероятностью на внутреннем цилиндре и забивать сетку, не допуская газ внутрь. Таким образом, в задаче необходимо получить пространственное распределение параметров поля течения гексафторида (плотности, макроскопической скорости, температуры, давления) и концентрации крупных примесей внутри и в окрестности датчика давления.

Предполагаются следующие подходы к решению. В режимах течения гексафторида от свободно молекулярного до вязкого исследование проводится методом прямого статистического моделирования с учетом столкновения и передачи импульса молекулами гексафторида крупным примесным частицам. В случае с вязким газом задача значительно усложняется, и предлагается два подхода к ее решению. В первом случае отдельно методами численного решения полной системы уравнений Навье – Стокса получается поле течения одного гексафторида (без примесей). Далее рассматривается уравнение диффузии для примесных частиц в поле течения гексафторида. Во втором случае аналогично получаем поле течения гексафторида. Далее, используя метод прямого статистического моделирования, рассматриваем свободномолекулярное течение крупных частиц, однако на каждом итерационном шаге изменяем скорость каждой такой частицы, согласно численному решению уравнения Фокера – Планка – Колмогорова в поле гексафторида (т.е. в этом случае рассматривается диффузия системы броунских частиц).

Реализация релаксационных свойств асфальтобетонной смеси при уплотнении

М.А. Завьялов (Омск)

В результате исследования получено аналитическое условие рациональной скорости движения дорожных катков при уплотнении асфальтобетонной смеси, то есть скорости, при которой реализуется период релаксации уплотняемой смеси. Были установлены зависимости между такими важными технологическими показателями, как: время релаксации и угол внутреннего трения, абсолютная и относительная деформация, модуль упругости смеси, контактные напряжения, деформации, показатель степени уплотняемости смеси. Обоснован закон, по которому происходит релаксация напряжений в асфальтобетонной смеси за время контакта вальца дорожного катка со смесью при его *i*-ом проходе. Доказано, что период релаксации напряжений асфальтобетонной смеси определяет выбор величины рациональной скорости уплотняющего агрегата, поскольку время контакта смеси с уплотняющим телом должно быть не меньше периода релаксации напряжений. Полученные закономерности позволяют разработать алгоритм определения параметров процесса уплотнения асфальтобетонной смеси, при котором достигается высокое качество покрытия, а энергозатраты минимальны. Показано, что реализация релаксационных свойств смеси в процессе ее уплотнения и, как следствие, обеспечение рациональной скорости движения катков при уплотнении смеси позволяют достигнуть важнейших показателей: качества покрытия и наименьшей энергоемкости процесса уплотнения.

Анализ теоретических и экспериментальных данных позволил получить качественные характеристики зависимостей между величинами абсолютной деформации уплотняемого асфальтобетонного слоя и контактного напряжения, создаваемого катком при условии реализации и не реализации релаксационного процесса асфальтобетонной смеси. Когда процесс релаксации уплотняемой асфальтобетонной смеси реализуется, напряжения в уплотняемом слое падают практически до нуля. Далее, при каждом последующим контакте катка с поверхностью уплотняемого слоя, последний начинает деформироваться с начального момента контакта, а не с запаздыванием. Запаздывание процесса деформирования происходит, когда время тратится на преодоление остаточных упругих напряжений, что имеет место при отсутствии реализации процесса релаксации. Как следствие этого, уменьшение величины абсолютной деформации при повторных контактах катка с уплотняемым слоем происходит по линейному закону, если процесс релаксации реализуется, и имеет нелинейную зависимость в противном случае. Таким образом, для обеспечения стабильного приращения величины абсолютной деформации асфальтобетонного слоя в случае не реализации процесса релаксации необходимо увеличить контактные напряжение, что приводит к дополнительным энергозатратам.

Спектральные свойства длинных магнитогидродинамических волн в идеально проводящей вязкой жидкости в вертикально стратифицированном магнитном поле

А.И. Задорожный (Ростов – на - Дону)

В линейной постановке изучаются свободные длинноволновые колебания однородной вязкой несжимаемой жидкости бесконечной электрической проводимости в поле гравитационных сил. Снизу жидкость ограничена твердой стенкой, сверху – свободной поверхностью (СП), граничащей с вакуумом (неионизированным газом). Напряженность стационарного горизонтального магнитного поля в жидкости достаточно произвольным образом меняется по вертикали. Создание подобного рода магнитных полей дает возможность влиять на движение жидкой среды. Выполняется условие прилипания на твердой стенке, кинематическое условие на СП, условия сопряжения электромагнитных полей и компонент тензора полных напряжений на границах раздела сред.

В конечном счёте получена спектральная краевая задача для обыкновенного интегро - дифференциального уравнения второго порядка типа Фредгольма. Входными параметрами являются гидродинамическое число Рейнольдса и безразмерная функция Альфвена, зависящая от квадрата напряженности стационарного магнитного поля (при постоянстве последнего это – число Альфвена). Поставленная так задача принадлежит классу самосопряженных квадратичных операторных пучков. При неподвижности твердой стенки устанавливается, что спектр - счетный, пучок является диссипативным; выводится условие его сильной демпфированности (апериодичности всех мод), доказывается существование лишь конечного числа затухающих колебательных режимов.

Выявляется наличие одной поверхностной волновой моды, счетного набора вязких альфвеновских мод, имеющих характер внутренних волн, описываются «медленные» и «быстрые» апериодические режимы. При определенной конфигурации магнитного поля у дифференциального оператора появляются точки поворота. Им отвечают дополнительные моды, имеющие аналогию с известными в геофизике нехарактерными внутренними волнами. В идеальной жидкости они сопровождаются тангенциальным разрывом скорости, который сглаживается наличием молекулярной вязкости.

Случай движения твердого дна с постоянной скоростью в направлении горизонтальной оси сводится к рассмотренному выше. Результатом является сдвиг всего спектра вдоль мнимой оси на величину безразмерной скорости равномерного потока. Следствием может стать эффект «запирания» волновода, то есть отсутствия волн, распространяющихся вверх по потоку, и увеличения фазовых скоростей прогрессивных волн, бегущих вниз по нему.

Компьютерный синтез и исследование случайных полей структуры однонаправленно армированных волокнистых композитов

А.В. Зайцев, А.В. Лукин, Н.В. Трефилов (Пермь)

Исследование влияния случайной структуры на механическое поведение композиционных материалов при нагружении может быть осуществлено экспериментально в результате обработки микрошлифов, а также на основе анализа плоских или пространственных модельных синтезированных структур.

С помощью аппарата корреляционных функций проведено исследование закономерностей генерации модельных плоских структур двухфазных однонаправленно армированных композитов с круглыми и эллиптическими в поперечном сечении волокнами, сгенерированных с использованием различных алгоритмов. Для каждого из реализованных алгоритмов синтеза проанализированы случайные поля и определенно максимальное объемное наполнение материала в случае наличия или отсутствия гарантированной прослойки матрицы вокруг волокон. Компьютерный синтез структур с высокой степенью наполнения связан с корректировкой взаимного расположения частиц армирующего наполнителя (дополнительным смещением и, при необходимости, разворотом волокон). Это является причиной изменения типа случайного поля структуры с локально - эргодического на квази – локально - эргодический вследствие внесения в это поле квази - детерминированных составляющих.

Установлено, что отсутствие периодической составляющей в случайных полях, соответствующих разряженным и плотноупакованным структурам, является следствием возможности соприкосновения и дополнительного упорядочения армирующих элементов. Обнаружены и объяснены эффекты самоорганизации и регуляризации, проявляющиеся при генерации плотноупакованных случайных структур. Проанализировано влияние законов распределения толщины гарантированной прослойки матрицы, формы и размеров включений на свойства случайных полей. Проведено сравнение результатов компьютерного синтеза случайной структуры с данными, полученными в результате обработки микрошлифов однонаправлено армированных стеклопластиков на основе эпоксидной матрицы. Сформулированы принципы построения алгоритмов синтеза случайных структур двухфазных композитов. Обоснован выбор масштабных коэффициентов и предложены новые единые аппроксимационные зависимости нормированных корреляционных функций структуры волокнистых композитов во всем диапазоне изменения объемной доли армирующих элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 01–01–96479).

Моделирование исторических цунами, сопровождавших Черноморские землетрясения

А.И. Зайцев, А.С. Козелков, А.А. Куркин, И.Ф. Николкина (Н. Новгород)

В отличие от Дальневосточного побережья России, где цунами является достаточно частым событием, Черное море в отношении бывших здесь цунами и возможной цунамиопасности изучено значительно хуже. Между тем в Черном море за всю историю зарегистрировано, по крайней мере, уже более 20 цунами (здесь, кроме обычных цунами, учтены факты возмущений морской поверхности за счет удаленных сотрясений на суше, а также неясного происхождения), так что опасностью цунами нельзя пренебречь. К сожалению, дать надежный прогноз характеристик цунами в Черном море пока еще не удается. Практически все исторические цунами заметно проявлялись на относительно небольших расстояниях от источника. Как правило, магнитуда вызвавшего их землетрясения была невелика, что и обусловило локальный характер цунами. Механизмы генерации цунами слабыми землетрясениями еще не достаточно изучены. Сейчас распространенным становится мнение, что здесь, по-видимому, главную роль играют обвалы прибрежных скал и подводные оползни.

В данной работе мы приводим результаты моделирования исторических цунами, сопровождавших Черноморские землетрясения, выполненные на основе комплекса программ TUNAMI [1], используемого сейчас международным содружеством для моделирования цунами в открытом море. Получено распределение высот волн в различных пунктах побережья и расчетные мареограммы для волн цунами, сопровождавших землетрясения 12.09.1927 (магнитуда 6.5) и 26.06.1927 (магнитуда 5.5) в районе Ялты, землетрясения 557 года (магнитуда 7.5) южнее г. Бургас (Болгария, Босфор) и 04.10.1905 (магнитуда 7) в районе Анапы, а также сильное землетрясение 11.10.1869 (магнитуда 7-8 баллов) с эпицентром около г. Судак. Результаты расчетов сопоставляются с известными данными. Обсуждаются основные особенности проявления цунами в прибрежной зоне при разных расположениях источника. Показано, что логнормальное распределение является хорошей аппроксимацией распределения высот цунами в Черном море.

1. Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura N. Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme (IUGG/IOC Time Project), IOC Manual, UNESCO, 1997, № 35.

Неустойчивость сферической формы пузырька при лазерной кавитации

К.Р. Закиров (Уфа)

Известно, что при схлопывании парогазовых пузырьков происходит значительная кумуляция энергии. Одним из ограничителей такой кумуляции является неустойчивость сферической формы пузырька. Представляется интересным определить, при каких исходных параметрах (начальный радиус пузырька, окружающее гидростатическое давление, плотность жидкости и т.д.) развитие несферичности при схлопывании будет минимальным.

В данной работе для исследования эффектов несферичности проводится двумерное моделирование динамики пузырька в сжимаемой жидкости. В качестве тестирования вычислительной программы был проведен расчет схлопывания пузырька без отклонений от сферической формы, который сравнивался с соответствующим расчетом по одномерной программе.

При лазерной кавитации влияние несферичности пузырька на процесс схлопывания наиболее полно проявляется в следующем эксперименте. При фиксированной энергии лазерного импульса, порождающего паровую каверну, варьируется окружающее давление в жидкости. Степень кумуляции энергии при схлопывании определяется интенсивностью излучения света пузырьком во время коллапса. Имеется немонотонная зависимость интенсивности излучения от окружающего давления жидкости [1]. Двумерное численное исследование данной задачи показало, что процесс потери сферичности при схлопывании и приобретения её при расширении пузырька играет ключевую роль в возникновении немонотонной зависимости степени кумуляции от изменения окружающего давления.

1. B. Wolfrum, T. Kurz, O. Lindau, and W. Lauterborn Luminescence of transient bubbles at elevated ambient pressures // Physical Review E, 2001, V. 64, 046306 – 5.

Эволюция альвеновской волны при однородной деформации плазмы вдоль крупномасштабного магнитного поля

С.Н. Замоздра (Челябинск)

Задача об альвеновской волне в конечно - проводящей плазме, однородно деформируемой вдоль крупномасштабного магнитного поля, решена методом разделения переменных. Показано, что пространственный профиль волны в лагранжевых координатах подчиняется уравнению затухающего гармонического осциллятора. Эволюция колебаний во времени описывается линейным ОДУ второго порядка с переменными коэффициентами. Из его численного решения следует, что амплитуда колебаний скорости зависит от плотности D среды по закону $D^{1/4}$, если начальное время затухания волны намного больше времени деформации. В этом случае давление волны меняется как $D^{3/2}$, то есть быстрее, чем тепловое давление. Указанное соотношение мало чувствительно к начальному периоду T_0 волны и выполняется даже в случаях, когда T_0 сравним со временем деформации. Обнаружено, что решение существенно зависит от используемой аппроксимации для проводимости плазмы. Исследовано нарушение обмена энергией между флуктуациями скорости и магнитного поля в случае быстрой деформации.

На основе предыдущих результатов найдено завершённое аналитическое решение для плотности энергии альвеновской волны. В большей части пространства параметров оно хорошо согласуется с вышеуказанными численными решениями. Предлагаемая модель может быть применена в частности для оценки вариаций волнового давления в ходе гравитационного коллапса космических объектов.

Генерация продольных вихревых структур в слое смешения сверхзвуковой недорасширенной струи

В.И. Запрягаев, Н.П. Киселёв (Новосибирск)

Изучение явления образования и развития продольных вихревых структур в слое смешения свободной неизобарической сверхзвуковой струи, истекающей в затопленное пространство, при высоких числах Рейнольдса начато сравнительно недавно. Интерес к изучению этого явления обусловлен как широким распространением сверхзвуковых струй и слоев смешения в таких технических устройствах как эжекторы, камеры смешения и т. д., так и поиском путей управления процессами смешения в сжимаемых сдвиговых слоях.

Эксперименты по исследованию продольных вихревых структур проводились на струйном модуле гиперзвуковой аэродинамической трубы периодического действия Т-326. Следует отметить, что работ по изучению влияния контролируемых возмущений на генерацию продольных вихревых структур в высокоскоростном слое смешения недостаточно. Эксперименты выполнены на специально изготовленном высокоточном азимутально-радиальном координатнике, позволяющим перемещать трубку Пито по продольной, поперечной и азимутальной координатам. Для выявления влияния уровня вносимых возмущений на характеристики возникающих стационарных продольных вихревых структур в слое смешения, были выполнены работы на специально изготовленных соплах с числами Маха на срезе M_a= 1.0 и 2.0. Внутренние поверхности сопл были изготовлены с высокой степенью точности (полированы). На внутреннюю поверхность сопла были нанесены микронеровности (“микротабы”) в количестве 8 шт. с шагом 45^0 и толщиной 0.04 и 0.08 мм. После чего были проведены подробные исследования азимутальных и радиальных распределений полного измеренного давления в сверхзвуковой недорасширенной струе в нескольких сечениях: x/Ra= 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0. (Ra= 15 мм - радиус сопла).

В результате экспериментов выявлены искусственные продольные вихревые структуры с заданным азимутальным волновым числом. Получены зависимости распределения Фурье-амплитуд возмущений от азимутального волнового числа для сопла с микронеровностями и проведено сравнение полученных результатов с естественными возмущениями. Выявлено существенное влияние “микротабов” на развитие продольных вихрей. Значение амплитуды возмущений оказалось в 8-10 раз больше, чем для естественных возмущений. Таким образом, показана возможность генерации стационарных продольных вихревых структур в слое смешения высокоскоростных струй с применением малых искусственных возмущений.

Работа поддержана РФФИ (грант № 02-01-00515).

Нелинейная динамика трубопроводов, возбуждение периодических и хаотических колебаний

Д.М. Зарипов, М.А. Ильгамов, Р.Л. Лукманов (Уфа)

Рассматриваются изгибные колебания горизонтальной и вертикальной труб, заполненных жидкостью, при различных условиях закрепления концов. По трубе распространяется гармоническая волна давления в жидкости. Средняя скорость движения жидкости в трубе принимается равной нулю. При предположении малости прогиба по сравнению с длиной трубы и угла поворота сечения по сравнению с единицей колебания описываются нелинейным уравнением. На концах ставятся граничные условия шарнирного закрепления или жесткой заделки.

Для решения поставленной задачи предлагается итерационная процедура, для которой доказана сходимость с любого начального приближения, сводящая решение исходной нелинейной задачи к последовательности линейных задач с постоянными коэффициентами. Это позволило на каждой итерации выписывать решение в виде ряда по собственным функциям оператора четвертой производной, подчиненного соответствующим однородным краевым условиям задачи. Преимущество данной методики, например, перед схемой Рунге-Кутта 4-го порядка точности, наиболее сильно проявляется при увеличении числа собственных функций.

Разработана программа, позволяющая прослеживать динамику колебаний трубы при различных входных параметрах. Кроме того, программа позволяет проводить анализ характера колебаний в различных пространствах варьируемых параметров на основе тех или иных характеристик динамических систем, выявлять области периодических и хаотических колебаний. В частности, получены данные, иллюстрирующие степень хаотичности колебаний на основе величины хаусдорфовой размерности при варьировании каких-либо двух параметров системы. При этом для подсчета хаусдорфовой размерности предлагается новый достаточно эффективный алгоритм.

Анализ численных экспериментов показал сильную зависимость характера колебаний от частоты волны давления. Проведено также исследование зависимости частоты и амплитуды свободных колебаний от начального прогиба трубы. Анализируется разница случаев горизонтального и вертикального расположения трубопроводов. Выявлены условия возникновения параметрического резонанса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-01-97911).

Оценка полных и частичных равновесий в сплошных средах

М.С. Зароднюк, Б.М. Каганович, С.П. Филиппов (Иркутск)

Сфера применения классической равновесной термодинамики была значительно расширена с развитием методов термодинамического анализа уравнений движения [1, 2] и созданием моделей экстремальных промежуточных состояний (МЭПС) [3, 4], которая позволяет просматривать всю область достижимости из заданного исходного состояния и находить равновесие (частичное или полное), обладающее важными для исследователя свойствами. Однако проблема оценки осуществимости отыскиваемых в результате термодинамического моделирования равновесий остается открытой.

Поскольку осуществимость состояний в физико-химических системах определяется химической кинетикой и процессами переноса, то для ее оценки, естественно, требуется учет характеристик этих процессов непосредственно в ходе термодинамического анализа. Для решения возникшей задачи авторами предлагается методика исключения времени из описания движения на основе предположения, что моделируемым процессам удовлетворяют дифференциальные уравнения первого порядка с не зависящими в явном виде от времени правыми частями [5]. В зависимости от особенностей изучаемой системы либо непосредственно задаются ограничения на значения этих правых частей, либо последние подставляются в выражение для суммарной характеристической термодинамической функции, условия монотонности изменения которой включаются в МЭПС.

1. Горбань А.Н. Обход равновесия: уравнения химической кинетики и их термодинамический анализ. – Новосибирск: Наука, 1984. 226 с.

2. Feinberg M. Recent results in optional reactor syntesis region theory// Chem. Eng. Sci. – 1999. Vol. 54, № 7. P. 2535 – 2544.

3. Каганович Б.М., Филиппов С.П. Равновесная термодинамика и математическое программирование. – Новосибирск: Наука, 1995. 236 с.

4. Горбань А.Н., Каганович Б.М., Филиппов С.П. Термодинамические равновесия и экстремумы: Анализ областей достижимости и частичных равновесий в физико-химических и технических системах. – Новосибирск: Наука, 2001. 296 с.

5. Каганович Б.М. Об осуществимости равновесий в физико-химических системах. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2002. 43 с.

Построение вейвлет-базисов с компактным носителем, адаптированных к дифференциальным операторам

В.Г. Захаров, И.Н. Ипанов (Пермь)

Во многих реальных задачах возникает необходимость решения дифференциальных уравнений, где в качестве искомых и/или явно входящих в уравнения функций выступают функции, имеющие сингулярности или большие градиенты. При решении такого рода уравнений традиционные численные методы, такие, например, как конечно-разностные или спектральные, становятся либо неустойчивыми, либо не дают необходимой точности из-за возникновения осцилляций вследствие явления Гиббса. Выходом из данной ситуации могло бы являться применение метода Галёркина с использованием вейвлет-базисов, которые имеют как частотную, так и физическую локализацию, а также и достаточно регулярны. Вейвлет-базисы позволяют минимизировать указанные выше эффекты, а также предоставляют возможность простого построения адаптивных расчетных схем для решения эволюционных уравнений. Тем не менее, применение вейвлет-базисов для решения дифференциальных уравнений все еще не получило достаточного распространения, которое можно было ожидать, исходя из их потенциальных возможностей. Одной из причин является сложный, хотя и достаточно разряженный, вид матриц дифференциальных операторов в вейлет-базисах. Напомним, что при использовании тригонометрических функций матрица любого линейного дифференциального оператора имеет диагональный вид.

Нашей целью являлось построение биортогональных [1] вейвлет-базисов, адаптированных к заданному дифференциальному оператору так, чтобы максимально упростить структуру результирующей матрицы жесткости, возникающей вследствие применения метода Галеркина [2]. На данный момент разработана методика построения биортогональных вейвлет-базисов на основе вейвлетов Добеши, которые диагонализуют матрицы жесткости дифференциальных уравнений вида $u^{(2m)}(x) = g(x)$. Для более сложных уравнений, в которые входит сумма дифференциальных операторов с постоянными коэффициентами, построены биортогональные вейвлет-базисы, дающие блочно-диагональный вид матриц жесткости. В дальнейшем планируется получить вейлет-базисы, полностью диагонализующие представление суммы дифференциальных операторов.

1. Tchamitchian Ph. Biorthogonalite et theorie des operateurs Rev. Math. Iberoam. V. 3. P. 163-189. 1987.

2. Dahlke S. , Weinreich I. Wavelet-Galerkin methods: an adapted biorthogonal wavelet basis. Constr. Approx., V. 9. P. 237-266. 1993.

Пороговые магнитные поля в неограниченном ферронематике

А.Н. Захлевных (Пермь)

Изучено влияние внешнего магнитного поля на ферронематик (ФН) – разбавленную суспензию игольчатых магнитных частиц в нематическом жидком кристалле. В ферронематике наряду с диамагнитным (квадрупольным) вкладом нематической матрицы в свободную энергию имеется и ферромагнитный (дипольный) вклад, обусловленный влиянием магнитного поля на магнитные моменты феррочастиц. При положительной диамагнитной анизотропии и гомеотропном характере сцепления магнитных частиц с матрицей эти вклады являются конкурирующими и стремятся повернуть ориентационную структуру в противоположных направлениях. В работе в рамках континуальной теории найдено равновесное распределение векторов намагниченности и директора в магнитном поле для ферронематика с конечной энергией сцепления магнитных частиц с жидкокристаллической матрицей. Показано, что в слабых полях устойчиво ферронематическое состояние I с гомеотропными условиями сцепления магнитных частиц с матрицей. В этой фазе упорядочение осуществляется дипольным механизмом. При достижении полем порогового значения это состояние сменяется угловой фазой II, в которой векторы напряженности поля, директора и намагниченности компланарны, а углы ориентации намагниченности и директора относительно поля являются функциями материальных параметров ФН и напряженности поля. Ферронематическое состояние II является результатом конкуренции дипольного и квадрупольного упорядочения. В этой ферронематической фазе происходит изменение условий сцепления магнитных частиц с матрицей от гомеотропных к планарным. Указанное пороговое поле имеет смысл поля Фредерикса, так как в этом поле происходит своеобразный переход Фредерикса в неограниченном ферронематике. С ростом напряженности поля состояние II сменяется состоянием III, в котором директор, векторы намагниченности и напряженности поля параллельны, т.е. в фазе III квадрупольный механизм проявляет себя в полной мере наряду с дипольным. Это поле имеет смысл так называемого поля насыщения. Найдена зависимость пороговых полей (поля Фредерикса и поля насыщения) от материальных параметров ферронематика.

Оценки показывают, что для реальных ферронематиков пороговые поля оказываются порядка сотни эрстед, так что описанные переходы между ферронематическими фазами I – III должны наблюдаться в реальных ферронематиках в достаточно слабых полях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-02-96476) и Американским фондом гражданских исследований и развития (CRDF) (грант № PE-009-0).

Использование численных методов для выделения поверхностей разрывов в задачах динамики деформируемых сред

П.В. Зиновьев (Владивосток)

Методы выделения поверхностей разрывов при численных расчётах газодинамических задач известны. Основываются они либо на методе характеристик с алгоритмическим внесением специальных процедур, например “выделение плавающих разрывов”, либо на решении задачи о распаде разрыва с последующим использованием подвижных сеток. Применение подобных подходов в нелинейной динамике деформируемых твёрдых тел проблематично из-за взаимозависимости в них, по существу, двух процессов распространения граничных возмущений: изменения объёмных деформаций и деформаций изменения формы. Поэтому здесь используются, главным образом, различные варианты схем сквозного счёта. Следует, однако, заметить, что, из-за наличия в деформируемых телах более значимого диссипативного механизма (пластичность, ползучесть), проблема выделения фронтов разрывов в твёрдых деформируемых средах не стоит столь остро, как в газовой динамике. Иначе, использование здесь разных вычислительных методик, основанных на процедурах сквозного счёта, гораздо более оправдано. И всё же существуют ситуации в динамике деформируемых твёрдых тел, когда нестационарность явления столь существенна (отражение и взаимодействие ударных волн при высокоскоростном соударении и др.), что выделение нелинейных разрывов может стать необходимым.

В работе предлагается способ расчёта ударного деформирования, выделяющий поверхность разрыва путём включения в неявную разностную схему одновременное вычисление параметров прифронтовой асимптотики, то есть параметров разложения решения непосредственно за поверхностью разрывов в асимптотический ряд. Способы построения таких разложений могут основываться на методе возмущений или на методе прифронтовых лучевых разложений. Здесь сосредоточим внимание на особенностях использования прифронтовых лучевых разложений при конструировании конечно-разностных схем расчётов, интересуясь, главным образом, ударным деформированием, меняющим форму тела. На примере несжимаемой упругой среды, имеющей предварительные деформации, показан способ построения прифронтового лучевого разложения и вариант конечно - разностной схемы расчётов.

Новый вид кумуляции энергии и импульса метаемых взрывом пластин и оболочек

С.И. Зоненко, Г.Г. Черный (Москва)

В работе рассмотрена устойчивость плоского слоя жидкости по отношению к длинноволновым возмущениям при его движении под действием постоянного перепада давления. Обнаружено образование и развитие своеобразной периодической структуры слоя.

Полученные теоретические результаты были использованы при постановке экспериментов по метанию взрывом медных пластин и интерпретации результатов их взаимодействия с металлическими преградами.

Общим результатом работы является обнаружение нового механизма кумуляции импульса и энергии летящей пластины. Этот механизм обусловлен неустойчивостью пластины в условиях динамического воздействия, когда поведение металла можно моделировать поведением жидкой среды.

Для некоторых практических целей такой механизм кумуляции может иметь значительные преимущества перед известным и широко используемым способом создания высокоскоростных кумулятивных струй при косом соударении пластин.

Фазовые переходы в магнитореологических суспензиях

А.Ю. Зубарев, Л.Ю. Искакова, А.П. Романчук (Екатеринбург)

Многочисленные компьютерные и лабораторные эксперименты показывают, что под действием внешнего магнитного поля частицы в МРС объединяются в плотные капле- или колонноподобные агрегаты. Образование таких агрегатов ведет к резкому, вплоть до нескольких десятичных порядков, увеличению реологических и других характеристик МРС.

В работе рассматриваются следующие аспекты теоретического описания МРС с цепочками.

1. *Магнитореологическая суспензия как ансамбль цепочек*. Рассматривается модель, в которой не учитывается взаимодействие цепочек друг с другом. Построены функции распределения цепочек по размерам, проведена оценка среднего размера цепочек. Расчеты показывают возможность существования довольно длинных цепочечных агрегатов, когда величина магнитного поля превышает некоторое пороговое значение, что соответствует экспериментальным наблюдениям.

2. *Учет взаимодействия цепочек и их конденсация в плотные фазы*. Для упрощения вычислений считается, что все цепочки одинаковы и содержат число частиц, равное среднему числу частиц в цепочке. Определяется выражение свободной энергии системы, в которой учитывается энергия магнитного и стерического взаимодействия цепочек. Используя стандартные термодинамические соотношения, вычисляется химический потенциал ν и осмотическое давление p. Расчеты показывают, что если внешнее магнитное поле меньше некоторого критического значения, то ν и p – монотонно возрастают. При превышении данного значения на графиках ν и p появляются петли Ван-дер-Ваальса, указывающие на возможность расслоения суспензии на две фазы с разной плотностью частиц. Для сравнения результатов используется модель фазового перехода, где изначально предполагается, что все частицы индивидуальны. Тот факт, что в модели с цепочками фазовый переход наступает при значениях магнитного поля значительно меньших, чем в модели индивидуальных частиц, означает, что при повышении поля в МРС вначале образуются цепочечные кластеры, которые затем конденсируются в плотные фазы.

В работе предложен новый сценарий конденсационного фазового перехода в МРС под действием внешнего поля. В рамках этого сценария, в отличие от традиционных, основанных на классической теории Ван-дер-Ваальса, появление линейных цепочек предшествует образованию плотных фаз. В принципиальном отношении выводы и результаты работы соответствуют всем известным экспериментам.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 002-02-17731, № 02-01-6072 и № 01-01-00058) и грантом CRDF (грант № REC-005).

Неравновесные фазовые переходы в жидких кристаллах

А.Ю. Зубарев (Екатеринбург)

Теория равновесных жидкокристаллических переходов изотропная среда – нематик (I – N переходов) достаточно хорошо разработана. Целью этой работы является теоретическое исследование I – N переходов в термотропных жидких кристаллах в условиях стационарного сдвигового течения. Фундаментальным вопросом рассматриваемой проблемы является выбор условий стационарного сосуществования изотропной и нематической фаз. В отсутствии специфических гидродинамических сил, заставляющих молекулы перемещаться через межфазную границу условием устойчивого сосуществования фаз должно быть отсутствие диффузионного потока и непрерывность потока импульса через межфазную границу. Следовательно, как и в равновесных системах, одним из условий сосуществования однородных фаз может быть выбрано равенство химических потенциалов молекул в них. Для определения химических потенциалов мы представили свободную энергию F в виде классического функционала от функции распределения f по ориентациям молекул. Для функции f записали специальное уравнение Фоккера – Планка. Это уравнение было приближенно решено для обеих (I и N) фаз. Используя известные представления макроскопического тензора гидродинамических напряжений через моменты f, заодно оценили реологические характеристики жидкого кристалла в обоих – изотропном и нематическом состояниях. Используя в функционале F найденную функцию f, зависящую от градиента скорости как от параметра, мы рассчитали химический потенциал молекул в виде функции от параметра нематического порядка и градиента скорости $\dot{\gamma}$. Приравнивая химические потенциалы в I и N фазах, оценили температуру перехода в зависимости от $\dot{\gamma}$ и ориентации межфазной границы. Результаты показывают, что максимальная температура T_1 перехода (более высокая, чем равновесная температура перехода T_0) соответствует межфазной границе, расположенной в плоскости скорость потока – ее градиент. Минимальная T_2 (также более высокая, чем T_0) – в плоскости перпендикулярной градиенту скорости. Поэтому можно ожидать, что при охлаждении I фазы I - N переход произойдет при температуре T_1, при нагреве N фазы – при температуре T_2 с соответствующими ориентациями межфазной границы. В любом случае сдвиговое течение стимулирует возникновение N фазы.

Работа выполнена при поддержке фонда CRDF (грант № REC 005).

Цепочечные структуры в феррожидкостях

А.Ю. Зубарев, Л.Ю. Искакова (Екатеринбург)

Многочисленные компьютерные и лабораторные эксперименты показывают, что частицы в феррожидкостях могут образовывать линейно-цепочечные кластеры. Эти цепочки способны оказывать сильное влияние на макроскопические, особенно динамические, свойства феррожидкостей, поэтому их исследование необходимо для понимания микроскопической природы свойств и особенностей поведения феррожидкостей в лабораторных и технологических условиях.

В работе рассматриваются следующие аспекты теоретического описания феррожидкостей с цепочками.

1. *Феррожидкость как ансамбль цепочек.* Рассматриваются модели, в которых учитываются и не учитываются тепловые флуктуации формы цепей. Построены функции распределения цепочек по размерам, проведено их сравнение для различных моделей.

2. *Учет полидисперсности феррожидкости*. Рассмотрена бидиспрсная модель феррожидкости, в которой «крупные» частицы объединены в цепочки, мелкие – свободны и образуют облака плотности вокруг цепочек. Показано, что в зависимости от размера и концентрации «средних» частиц, их присутствие может или заметно уменьшить или, наоборот, увеличить средний размер цепочек. Последний эффект может быть особенно сильным, если феррожидкость содержит в качестве примесей немагнитные коллоидные частицы, неадсорбирующиеся полимерные клубки и другие примеси.

3. *Влияние цепочек на динамические свойства феррожидкостей*. Исследование этого влияния выполнено в простейшей модели цепочек как прямых стержнеобразных агрегатов, распределение которых по размерам определено в первой части работы. При этом учитывалось, что в условиях сдвигового потока гидродинамические силы приводят к разрыву цепочек, оценивалась максимальная длина неразрушенной цепочки. Выполнен расчет зависимости стационарной вязкости феррожидкости от магнитного поля при различных градиентах скорости потока, а также частотных зависимостей компонент комплексной вязкости при разных значениях магнитного поля и градиента скорости течения. Теоретические результаты сравнивались с данными экспериментов группы С. Оденбаха (Бремен, Германия). Показано, что при разумном подборе размеров «крупных» частиц, образующих цепочки, и их объемной концентрации удается достичь хорошего согласия теории и эксперимента и объяснить гигантские магнитореологические эффекты, наблюдавшиеся в этих экспериментах.

Работа выполнена при поддержке фонда CRDF (грант № REC 005).

Фрактальная структура коллоидного агрегата

А.Ю. Зубарев, А.О. Иванов (Екатеринбург)

Представлена нелинейная распределенная модель диффузионно - лимитированного роста трехмерного коллоидного агрегата [1]. Модель сформулирована на базе концепции сосуществующих взаимопроникающих континуумов. Она включает уравнение диффузии одиночных частиц, кинетическое уравнение комбинации (рекомбинации) одиночных частиц к (от) агрегатному каркасу и соответствующие граничные условия на поверхности занимаемого агрегатом объема. В модели учитывается, что диффузионное движение частиц внутри агрегата и их присоединение (отсоединение) к агрегату происходит в стесненных условиях. Рассматривается случай достаточно медленного, диффузионно - лимитируемого роста агрегата, при котором устанавливается равновесие между внутренними процессами комбинации - рекомбинации. Полученное аналитическое решение показывает, что агрегат содержит центральное плотное ядро и окружающую рыхлую зону, в которой концентрация агрегированных частиц φ меняется по степенному закону как функция пространственной координаты r ($\varphi \propto r^{1/2}$). Такое поведение является одним из основных признаков фрактального кластера, при этом вычисленное аналитически значение фрактальной размерности $d_f = 2.5$ оказывается универсальным и не зависит от физико - химических условий, реализуемых в коллоидной системе. Полученное значение весьма близко к известным экспериментальным данным: $d_f = 2.56 \pm 0.03$ [2], 2.52 ± 0.05 [3], 2.4 ± 0.1 [4]. Кроме того, рассмотренный режим эволюции кластера характеризуется таким же универсальным значением фрактальной размерности, что и классический DLA (Diffusion Limited Aggregation) режим: $d_f = 2.51 \pm 0.06$ [5], 2.495 ± 0.005 [6].

Работа поддержана грантами Президента РФ (№ 02-15-99308м), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-02-16115а, 01-02-16072а, 01-01-00058а, РФФИ-Урал № 01-02-96430) и выполнена в рамках научной тематики Научно-Образовательного Центра УрГУ (грант № REC-005) при финансовой поддержке АФГИР (CRDF) и Минобразования РФ.

1. A.O. Ivanov and A.Yu. Zubarev, Phys. Rev. E, 64 (2001) 041403; А.Ю. Зубарев, А.О. Иванов, Доклады АН 383 (2002) 472.

2. J. Feder et al., Phys. Rev. Lett. 53 (1984) 1403.

3. S.K. Sinha, T. Freltoft and J. Kjems, in *Aggregateion and Gelation*. edited by F. Family and D.P. Landau (North Holland, Amsterdam, 1984).

4. J. Kjems and T. Freltoft, in *Scaling Phenomena in Disordered Systems*. edited by R. Pynn and A. Skjeltorp (Plenum Press, New York, 1985).

5. T.A. Witten and L.M. Sander, Phys. Rev. B, 27 (1983) 5686; P. Meakin, Phys. Rev. A, 27 (1983) 1495.

6. S. Tolman and P. Meakin, Phys. Rev. A, 40 (1989) 428.

Формирование геометрических особенностей на свободной поверхности жидкостей в электрическом поле

Н.М. Зубарев (Екатеринбург)

Наиболее интересные нерешенные проблемы электрогидродинамики жидкостей со свободной поверхностью связаны с образованием особенностей – острий (заостренных лунок). Существенная нелинейность подобных процессов не позволяет использовать для их описания традиционную теорию возмущений по малому параметру - углу наклона поверхности. Это определяет необходимость нахождения точных решений уравнений движения, которые описывали бы эволюцию поверхности вплоть до формирования особых точек.

Автору настоящих тезисов удалось в рамках электрогидродинамики идеальной жидкости сформулировать несколько типовых задач, допускающих построение точных, в том числе и сингулярных решений. В качестве основных результатов исследований можно привести следующие.

(1). Найдены автомодельные решения уравнений движения, ответственные за процесс формирования на заряженной поверхности проводящих [1] и диэлектрических [2] жидкостей конических острий - динамических конусов Тейлора. Установлен характер поведения напряженности электрического поля, скорости движения жидкости и кривизны ее поверхности на заключительных стадиях коллапса электрокапиллярных волн.

(2). Обнаружено, что уравнения движения проводящей жидкости могут быть решены в пределе сильного внешнего электрического поля. Это позволило показать, что практически при произвольных начальных условиях на гладкой поверхности зарождаются точки с бесконечной кривизной, соответствующие слабым особенностям корневого типа [3].

(3). В результате исследования динамики развития неустойчивости свободной поверхности жидкого гелия, заряженной локализованными над ней электронами, обнаружено, что асимптотическое поведение системы описывается известными уравнениями лапласовского роста. Их интегрируемость в плоской геометрии позволила описать эволюцию границы вплоть до формирования на ней точек заострения, в которых бесконечными оказываются напряженность электрического поля, скорость движения жидкости и кривизна ее поверхности [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-02-16829) и УрО РАН.

1. Зубарев Н.М. Письма в ЖЭТФ, 2001, Т.73, В.10, С.613-617.

2. Zubarev N.M. Phys.Rev.E, 2002, V.65, No.5, art. no 055301.

3. Зубарев Н.М. ЖЭТФ, 1998, Т.114, В.6(12), С.2043-2054.

4. Зубарев Н.М. ЖЭТФ, 2002, Т.121, В.3, С.634-636.

Исследование дислокационной структуры и внутренних напряжений в устойчивых полосах скольжения

И.Ю. Зубко, И.Э. Келлер, П.В. Трусов (Пермь)

В экспериментах по циклическому деформированию кристаллических материалов с гранецентрированной кубической решеткой в зависимости от накопленной циклической деформации выделяют несколько стадий развития дислокационной структуры. Стадии хаоса и максимально упорядоченной ячеистой дислокационной структуры разделяет стадия появления устойчивых полос скольжения (лестничной структуры), состоящих из мультипольных стенок краевых дислокаций одной системы скольжения. Устойчивая полоса скольжения является двумерным объектом и идеально подходит для моделирования разработанными авторами плоскими моделями самоорганизации дислокаций, основанными на подходе клеточных автоматов, трактующем пространство, время и все события дискретными. В модели рассматривается многочастичное взаимодействие большого количества краевых дислокаций обоих знаков одной системы скольжения. Принятая в модели гипотеза аддитивности скоростей однородной упругой деформации кристаллической решетки и осредненной по объему пластической деформации позволяет задавать жесткость нагружающей системы и строить макроскопическую диаграмму деформирования образца с развивающейся дислокационной структурой. Модель описывает формирование из однородного случайного начального распределения дислокаций хаотической структуры, состоящей из жгутов диполей краевых дислокаций, преобразующейся затем в структуру, соответствующую строению устойчивой полосы скольжения. Прямые расчеты показали, что полученная структура обладает дальнодействующими полями внутренних напряжений, вопрос о существовании которых является дискуссионным и однозначного экспериментально обоснованного ответа не имеет. Также до конца не изучен вопрос о факторах, определяющих размеры дислокационной структуры - известные попытки теоретического описания образования дислокационной структуры не принимают во внимание, что такая структура находится в равновесии *при приложенной нагрузке* и, несмотря на взаимное экранирование дальнодействующих упругих полей дислокаций в такой низкоэнергетической структуре, должна содержать микронапряжения как при приложенной, так и при снятой нагрузке. В работе на основании прямого численного эксперимента показывается взаимосвязь характерных размеров дислокационной структуры устойчивой полосы скольжения и параметров поля микронапряжений структуры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96481) и Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009-0).

О растяжении и кручении нелинейно упругого цилиндра с винтовой дислокацией

Л.М. Зубов, А.В. Соколов (Ростов-на-Дону)

Исследуется взаимодействие крутильных и продольных деформаций в упругом круговом цилиндре, содержащем винтовую дислокацию. Задача рассматривается в нелинейной постановке в рамках конечных деформаций. Определено поле напряжений в цилиндре, создаваемое дислокацией. Установлено, что наличие винтовой дислокации вызывает закручивание цилиндра, а также изменение его длины (эффект Пойнтинга). Показано, что кручение свободного от внешних нагрузок цилиндра, обусловленное дислокацией, сопровождается укорочением в осевом направлении.

Предварительно напряжённое включение в растягиваемом и скручиваемом цилиндре

Л.М. Зубов, А.В. Попов (Ростов-на-Дону)

Рассматривается задача нелинейной теории упругости о растяжении и кручении составного нелинейно упругого цилиндра. Центральная часть цилиндра представляет собой включение в виде предварительно скрученного и растянутого стержня. Получены формулы для напряжений, возникающих в таком составном цилиндре. Доказано, что продольная сила и крутящий момент могут быть найдены как частные производные от потенциальной энергии деформации по обобщённым координатам – осевому удлинению и углу закручивания соответственно. Изучено влияние предварительно напряжённого включения на деформационные характеристики цилиндра, испытывающего растяжение и кручение, а также на распределение напряжений по телу цилиндра.

1. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – Наука, 1980.– 512 с.

Колебательная конвекция Марангони возле пузырька воздуха в жидкости с вертикальной стратификацией ПАВ

А.Л. Зуев, К.Г. Костарев (Пермь)

Хорошо известно, что термокапиллярная или концентрационно - капиллярная конвекция Марангони способна оказывать существенное влияние на протекание многих технологических процессов, в которых участвуют газовые включения в жидкой фазе. Особенно ее роль возрастает в случае, когда отсутствуют гравитационные механизмы движения, например, в условиях микрогравитации. Не случайно поэтому, что конвекции Марангони в последние годы уделяется столь пристальное внимание, однако, в основном, объектом исследования является термокапиллярное движение. Концентрационный вариант остается малоизученным, особенно экспериментально, хотя на практике его вклад в процессы массообменна часто оказывается на порядок выше.

В докладе приведены результаты экспериментального изучения концентрационно - капиллярной конвекции, возникающей вокруг пузырька воздуха в водном растворе с вертикальным градиентом концентрации поверхностно - активного вещества (ПАВ). Пузырек воздуха, имеющий форму цилиндрической таблетки, был помещен в тонкий слой жидкости между двумя параллельными прозрачными стенками - ячейку Хеле-Шоу. Применение оптических методов позволило изучить поведение пузырька, структуру конвективных течений и эволюцию полей концентрации вокруг него при различной пространственной (горизонтальной и вертикальной) ориентации ячейки.

Обнаружен и исследован новый эффект, представлявший собой возникновение колебательной неустойчивости процесса растворения ПАВ вблизи свободной поверхности пузырька. Предложено объяснение этого явления, заключающееся во взаимодействии диффузии, концентрационно - капиллярного и гравитационного механизмов конвекции. Представлены и обсуждаются результаты измерения периода колебаний в зависимости от времени, размеров пузырька, толщины слоя и физико - химических параметров жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ).

О тепловой конвекции в условиях контролируемых микроускорений

А.В. Зюзгин, Г.Ф. Путин, А.В. Чудинов, Н.Г. Щербакова (Пермь)

Экспериментально изучались режимы тепломассопереноса от точечного источника тепла, помещенного в сверхкритическую жидкость. Рабочая ячейка находилась под воздействием контролируемых микроускорений на борту орбитального аппарата.

Составлена карта режимов теплообмена. Обнаружены три типа распространения области тепловой неоднородности. Установлена их зависимость от режима вибрационного воздействия. Измерены пространственно - временные характеристики. Проведены поисковые эксперименты по наземному моделированию данной задачи. Структуры движений адекватны наблюдаемым в орбитальном эксперименте. Анализ данных орбитальных и наземных экспериментов позволил определить механизм генерации режимов тепломасоообмена.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-02-96479) и Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза CRDF (грант № РЕ-009-0).

Экспериментальное исследование границы раздела “сыпучая среда – жидкость” при горизонтальных вибрациях

А.А. Иванова, А.Ф. Кузаев (Пермь)

Изучаются закономерности формирования динамического квазистационарного рельефа на границе раздела двухфазной системы “песок – жидкость” в полости, совершающей интенсивные горизонтальные поступательные вибрации. Формирование рельефа происходит после перехода сыпучей среды в ожиженное состояние и связано с проявлением неустойчивости тангенциальных разрывов на границе раздела движущихся друг относительно друга сред (неустойчивость Кельвина–Гельмгольца). При этом поведение системы "песок–жидкость" аналогично поведению двух несмешивающихся жидкостей различной плотности при горизонтальных вибрациях. В данной работе исследуется вибрационная динамика сыпучей среды, состоящей из калиброванных по размеру сферических стеклянных частиц, в зависимости от безразмерной частоты вибраций. Исследования проводятся в полости прямоугольного сечения. Изучаются порог возникновения рельефа и его характеристики (длина волны, высота) в зависимости от параметров вибраций, варьируются размер частиц и вязкость жидкости.

Показано, что в широком интервале безразмерных частот, включая предельно низкие (вязкая жидкость, мелкие частицы), порог возникновения рельефа определяется критическим значением безразмерного вибрационного ускорения, а форма рельефа в надкритической области – вибрационным параметром, который пропорционален квадрату амплитуды вибрационной скорости. При этом изменение рельефа с вибрационным параметром зависит от безразмерной частоты, в области низких частот наблюдаются структуры, характерные для бифуркации удвоения пространственного периода. С увеличением вибрационного параметра длина волны и высота рельефа увеличиваются. При достаточно сильных вибрациях гребни холмов из ожиженной сыпучей среды достигают верхней границы полости, возможно формирование устойчивой системы двумерных холмов, разделенных чистой жидкостью, с крутыми, практически вертикальными склонами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и совместной программы CNRS–РФФИ (грант PICS № 1170 / РФФИ 01-01-22005 НЦНИ-а).

Экспериментальное исследование взаимодействия двух сферических тел в жидкости при вибрациях

А.А. Иванова, А.Ф. Кузаев (Пермь)

Наличие в жидкости твердых включений – распространенное явление. В статическом силовом поле, например, в поле силы тяжести, такие системы находятся в состоянии устойчивого равновесия: более плотные тела тонут. Интересные эффекты, привлекающие внимание исследователей, наблюдаются при вибрационном воздействии на неоднородные по плотности гидродинамические системы. Под действием вибраций включения, плотность которых больше плотности окружающей их жидкости, могут всплывать, асимметричные тела изменяют ориентацию в пространстве, кроме того, тела взаимодействуют между собой и со стенками полости. Все это является результатом проявления средних массовых сил вибрационной природы.

В данной работе при вибрациях экспериментально изучается гидродинамическое взаимодействие двух сферических тел в жидкости. Опыты проводятся со стальными шариками одинакового размера, находящимися в заполненном водой коаксиальном зазоре с жесткой непроницаемой перегородкой. Полость совершает высокочастотные угловые качания вокруг оси симметрии, определенным образом ориентированной в поле силы тяжести, так что в отсутствие вибраций под действием силы тяжести тела соприкасаются. Постановка эксперимента такова, что при вибрационном воздействии тела совершают свободные колебания вдоль линии, проходящей через их центры, при этом тела могут отталкиваться друг от друга. Методика проведения опытов позволяет определить силу взаимодействия тел по расстоянию, на которое они расходятся. Исследуется сила отталкивания в зависимости от амплитуды и частоты вибраций. Из опытов следует, что осредненное взаимодействие тел растет с увеличением интенсивности вибраций. При этом определяющую роль играет амплитуда скорости вибраций. Построена обобщенная кривая взаимодействия на плоскости безразмерной вибрационной силы и относительного расстояния между телами. Видно, что с увеличением расстояния между телами сила взаимодействия ослабевает.

Работа поддержана РФФИ.

Исследование поведения границы раздела двух жидкостей при круговых вибрациях в зависимости от высоты полости

А.А. Иванова, С.И. Ташкинов (Пермь)

Экспериментально исследуется осредненная динамика границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в горизонтальном слое с круговой боковой границей, совершающем высокочастотные круговые вибрации в своей плоскости. Изучаются эффекты, обнаруженные экспериментально в [1]: осредненное вращение жидкости в направлении движения полости и пороговое возбуждение квазистационарного пространственного рельефа на границе раздела. Несмотря на то, что осредненные эффекты проявляются независимо, они оказывают влияние друг на друга, рельеф появляется на фоне вращения жидкости. В [2] теоретически показано, что возникновение рельефа вызвано неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца.

Эксперименты проводятся в постановке [1] с парой жидкостей флуоринерт – масло касторовое; жидкости заполняют кювету в равных объемах. Используется метод фото- и видео - регистрации границы раздела в стробоскопическом освещении с последующей обработкой видеоматериала. Вертикальный размер полости (толщина слоя) варьируется, что приводит к изменению безразмерного параметра, характеризующего отношение размера полости к периоду рельефа. Опыты показывают, что для данной пары жидкостей порог возникновения рельефа определяется амплитудой вибрационной скорости и практически не зависит от толщины слоя, чего нельзя сказать о форме рельефа и интенсивности осредненного движения жидкости. При уменьшении толщины слоя скорость осредненного движения снижается. Независимо от толщины слоя рельеф возникает и при малой надкритичности существует только в центральной части полости. С увеличением интенсивности вибраций рельеф распространяется на всю поверхность раздела, его период уменьшается. Интенсивность движения жидкости в отсутствие рельефа прямо пропорциональна пульсационному числу Рейнольдса.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-01-00416 а и № 02-01-06529 мас).

1. Иванова А.А., Козлов В.Г., Ташкинов С.И. Динамика границы несмешивающихся жидкостей при поляризованных по кругу вибрациях (эксперимент) // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 6. С. 21–30.

2. Черепанов А.А., Шипулин Д.В. Поведение границы раздела жидкостей в вибрационном поле, поляризованном по кругу // Конвекция в системах несмешивающихся жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. С. 134–154.

Исследование особенностей процесса деформирования и разрушения элементов конструкций в условиях неоднородно-напряженного состояния по тепловому излучению

А.М. Иванов, Е.С. Лукин (Якутск)

Применение метода теплового излучения (МТИ) при статических испытаниях упругопластических материалов в условиях неоднородно - напряженного состояния позволяет определить наступление предельных состояний, по изменению температурного поля проследить за кинетикой развития пластических деформаций, по особенности изменения температуры на стадии предразрушения установить начало образования трещины [1]. МТИ основан на регистрации теплового излучения в инфракрасной области спектра. Как известно, пластическая деформация конструкционных сталей сопровождается выделением значительного количества тепла, пропорционального степени деформируемости. В качестве регистрирующего прибора в данной работе использован тепловизор ТКВр-ИФП, разработанный в Институте физики полупроводников (Новосибирск).

При упругом деформировании конструкционных сталей наблюдается понижение температуры образца, наступление локальной текучести устанавливается по повышению температуры. При статическом деформировании на стадии предразрушения элемента конструкции в условиях неоднородно напряженного состояния наблюдается кратковременный пик в изменении температуры [2]. Повышение температуры, вероятно, соответствует началу образования трещины в локальных областях, достигших критического значения напряжения. Следующее повышение температуры соответствует моменту страгивания трещины и разрушению образца.

Таким образом, МТИ может быть использован для определения наступления текучести материала, оценки предельно допустимых напряжений при статическом нагружении упругопластических материалов в условиях неоднородно-напряженного состояния.

1. Иванов А.М., Лукин Е.С., Ларионов В.П. К исследованию деформирования и разрушения твердых тел. // ДАН, ТФ. – 2002. – Т. 384. - № 4. – С. 469-472.

2. Лукин Е.С., Иванов А.М., Сыромятникова А.С. Исследование деформирования и разрушения металлических материалов и элементов конструкций по тепловому излучению. // Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – г.Якутск, 16-20 июля 2002 г. – Якутск. – 2002. – Часть II. – С. 112-121.

Двойное лучепреломление в полидисперсных феррожидкостях, содержащих короткие цепочечные агрегаты

А.О. Иванов, С.С. Канторович (Екатеринбург)

Двулучепреломление относится к классу явлений, в которых определяющую роль играет микроструктура магнитных жидкостей. Известные теории связывают этот эффект либо с ориентацией несферичных феррочастиц во внешнем поле [1], либо с возникновением цепочечных или микрокапельных агрегатов [2,3]. Недавно нами была развита микроструктурная модель [4], рассматривающая полидисперсную феррожидкость как пространственно однородную систему из мелких феррочастиц, в которой взвешены короткие цепочечные агрегаты из частиц крупнодисперсных фракций. Причем в подавляющем большинстве эти цепочки содержат по краям одну-две мелкие частицы, что приводит к своеобразному «отравлению» краев цепочек. При этом не происходит дальнейшего удлинения агрегатов, даже состоящих из весьма крупных частиц. Количественное отличие результатов данной модели от известных цепочечных теорий заключается в том, что учет мелкодисперсных фракций приводит к существенному уменьшению средней длины цепочек. Однако их общее количество является значительным: фактически все феррочастицы крупнодисперсных фракций оказываются связанными в короткие цепочечные агрегаты.

Настоящая работа посвящена проверке адекватности модели на явлении двойного лучепреломления в слабых магнитных полях (по экспериментальным данным [5]). Структура цепочечных агрегатов рассчитывалась методом [4], исходя из данных о фракционном составе изучаемых феррожидкостей. Для определения разности показателей преломления использовались известные выражения [2,3], в которых учитывалось присутствие всех типов цепочек. Последние рассматривались как эллипсоиды вращения, параметры формы которых зависят от длины цепочек. Полученные результаты демонстрируют достаточно хорошее согласие между предсказаниями модели и опытными данными.

Работа поддержана грантами Президента РФ № 02-15-99308м, РФФИ (грант № 03-02-16115а) и выполнена в рамках научной тематики Научно-Образовательного Центра УрГУ (REC-005) при финансовой поддержке АФГИР (CRDF) и Минобразования РФ.

1. Ю.Н. Скибин, В.В. Чеканов, Ю.Л. Райхер, ЖЭТФ 32 (1977) 949.

2. S. Taketomi, Jpn. J. Appl. Phys. 22 (1983) 1137.

3. M. Rasa, J. Magn. Magn. Mat. 201 (1999) 170.

4. S. Kantorovich, A.O. Ivanov, J. Magn. Magn. Mat. 252 (2002) 244.

5. В.В. Падалка, К.В. Ерин, В сб. «10-ая Юбилейная Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям», Иваново: ИГЭУ, 2002.- С. 162.

«Ферромагнитное» состояние магнитных жидкостей

А.О. Иванов (Екатеринбург)

В последнее десятилетие в зарубежной научной литературе активное внимание уделяется компьютерному моделированию микроструктуры магнитных жидкостей. В работе [1] было обнаружено, что при высоких плотностях и интенсивностях магнито - дипольного взаимодействия в феррожидкостях происходит фазовый переход «жидкий парамагнетик – жидкий ферромагнетик», никогда не наблюдавшийся экспериментально. В дальнейшем этот фазовый переход был обоснован теоретически [2] с использованием теории среднего поля или самосогласованного метода функционала плотности энергии.

Нами были изучены свойства одночастичной функции распределения феррочастиц в ориентационном пространстве на базе подхода, сформулированного ранее [3]. При учете межчастичных магнито - дипольных взаимодействий в рамках теории возмущений 2-го порядка было показано, что самосогласованный подход функционала плотности энергии предсказывает фазовый переход системы в следующее состояние. Около 80 % феррочастиц имеют сонаправленные магнитные моменты, в то время как магнитные моменты остальных 20 % феррочастиц направлены противоположно. В ориентационном пространстве это сильно напоминает «ферримагнитное» состояние, не сопровождаемое переходом к упорядоченной кристаллической структуре. Поскольку нам неизвестны какие-либо физические доводы, объясняющее спонтанное ориентационное упорядочение в жидких системах магнитных частиц с межчастичным диполь - дипольным взаимодействием, этот результат представляется искусственным, нефизическим следствием самосогласованного приближения, эквивалентного теории среднего поля. Таким образом, принципиальный физический вывод [2, 3] о возможности существования в магнитных жидкостях спонтанного ориентационного упорядочения представляется весьма сомнительным.

Работа поддержана грантами Президента РФ № 02-15-99308м, РФФИ (грант № 03-02-16115а) и выполнена в рамках научной тематики Научно-Образовательного Центра УрГУ (REC-005) при финансовой поддержке АФГИР (CRDF) и Минобразования РФ.

1. D. Wei and G.N. Patey, Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 2043; J.J. Weis, D. Levesque and G.J. Zarragoicoechea, Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 913; J.J. Weis and D. Levesque, Phys. Rev. E 48 (1993) 3728; G. Ayton, M.J.P. Gingras and G.N. Patey, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 2360.

2. D. Wei, G.N. Patey and A. Perera, Phys. Rev. E 47 (1993) 506; H. Zhang and M. Widom, J. Magn. Magn. Mater. 122 (1993) 119; Phys. Rev. E 49 (1994) 3591; Phys. Rev. B 51 (1995) 8951; B. Groh and S. Dietrich, Phys. Rev. E 50 (1994) 3814; Phys. Rev. E 53 (1996) 2509.

3. A.O. Ivanov and O.B. Kuznetsova, Phys. Rev. E 64 (2001) 041405.

К теории магнитостатических свойств феррожидкостей с высокой интенсивностью диполь-дипольного взаимодействия

А.О. Иванов, О.Б. Кузнецова, Е.Н. Резников (Екатеринбург)

К настоящему времени достигнут значительный успех в теоретическом описании магнитостатических свойств феррожидкостей [1-3], в том числе для предельно концентрированных систем. Результаты указанных моделей для намагниченности и начальной восприимчивости магнитных жидкостей представлены в виде комбинаций от магнитных характеристик идеального парамагнитного газа той же концентрации и фракционного состава. Фактически единственным операционным параметром в этих моделях является начальная восприимчивость Ланжевена. По-видимому, в качестве физического объяснения весьма точного описания магнитостатических свойств реальных концентрированных феррожидкостей теориями [1-3] может рассматриваться тот факт, что средняя интенсивность межчастичного магнито - дипольного взаимодействия не является высокой.

Однако, в недавно появившейся работе [4] по компьютерному моделированию микроструктуры и магнитных свойств феррожидкостей получено, что универсальные зависимости [1-3], оперирующие с единственным параметром – начальной восприимчивостью Ланжевена, не дают хорошего соответствия для модельных слабо концентрированных систем с высокой интенсивностью магнито - дипольных взаимодействий. Для объяснения наблюдающегося рассогласования теоретических предсказаний и данных компьютерных экспериментов в настоящей работе рассмотрено обобщение модели [3] на случай учета межчастичных корреляций высших порядков по диполь - дипольному взаимодействию. Полученные выражения для начальной восприимчивости слабо концентрированной феррожидкости с крупными феррочастицами демонстрируют также наличие важного вклада от межчастичных корреляций, обусловленных центрально симметричной частью взаимодействия феррочастиц.

Работа поддержана грантами Президента РФ № 02-15-99308м, РФФИ (грант № 03-02-16115а) и выполнена в рамках научной тематики Научно-Образовательного Центра УрГУ (REC-005) при финансовой поддержке АФГИР (CRDF) и Минобразования РФ.

1. K.I. Morozov, A.V. Lebedev, J. Magn. Magn. Mat. 85 (1990) 51.

2. A.F. Pshenichnikov, J. Magn. Magn. Mat. 145 (1995) 319.1

3. A.O. Ivanov, O.B. Kuznetsova, Phys. Rev. E 64 (2001) 041405.

4. Z. Wang, C. Holm, H.W. Muller, Phys. Rev. E 66 (2002) 021405.

Моделирование рассеивания облака продуктов сгорания, образующегося при испытаниях РДТТ на открытом стенде

В.Н. Иванов, В.М. Суслонов, В.А. Шимановский (Пермь)

В настоящее время испытания и отжиг ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) осуществляются на специально оборудованном открытом стенде (с горизонтальным расположением двигателя и наклонной отбойной стенкой), что обусловливает выброс продуктов сгорания в атмосферу на большую высоту и их осаждение на значительную территорию. Процесс сгорания топлива - быстропротекающий (десятки секунд). При этом образуются высокотемпературные продукты сгорания (1500-3500°К) со сверхзвуковыми скоростями истечения из сопла и большими, как следствие, массовыми расходами загрязняющих веществ (100-700 кг/с). В продуктах сгорания содержатся твердые, газообразные и жидкие токсичные соединения: окись алюминия, хлористый водород, окислы азота, диоксид углерода и др.

Наиболее эффективным способом определения распределения загрязняющих веществ в результате испытаний, учитывающим конкретную конструкцию стенда, является разбивка всего процесса на характерные этапы и построение для каждого из них упрощенной, но достаточно адекватной (с практической точки зрения) модели, учитывающей теоретические и эмпирические данные. К таким этапам традиционно относят: истечение горячей сверхзвуковой струи из сопла сначала в горизонтальном направлении до отбойной стенки стенда, а затем под заданным углом в атмосферу и формирование облака (или клубов) продуктов сгорания; подъем и перенос ветром клубов продуктов сгорания до достижения ими высоты стабилизации; рассеивание облака, фазовые переходы и выпадение твердых и жидких примесей продуктов сгорания.

В докладе описываются подход к моделированию и численные алгоритмы, предназначенные для проведения оценочных расчетов по определению уровня загрязнения атмосферного воздуха продуктами сгорания, образующимися при огневых стендовых испытаниях РДТТ; расчетные схемы последнего этапа движения и рассеивания облака продуктов сгорания в атмосфере с учетом реальных моделей приземного и пограничного слоя атмосферы и достаточно больших размеров пространственно-временной области. Методика ориентирована на использование минимального набора исходных данных и параметров, которые известны или могут быть определены экспериментально.

Новизна подхода заключается в записи исходных трехмерных уравнений турбулентной диффузии в подвижной, расширяющейся системе координат с логарифмическим временем и построении трехмерных сеток с переменным шагом.

Численное моделирование процесса зарождения тайфунного вихря

М.Ф. Иванов, Е.М. Поварницын (Москва)

Предпринята попытка численного моделирования процесса зарождения тайфунного вихря в атмосфере Земли.

Развитый тайфун представляет собой интенсивный циклонический вихрь, обладающий колоссальной энергией $E \sim 10^{19}$ Дж. Своим существованием он, по-видимому, обязан режиму объединения мелкомасштабных атмосферных конвективных ячеек, обладающих, вследствие вращения планеты, ненулевой спиральностью $\alpha \sim \mathrm{V}(\nabla\times\mathrm{V})$. Процесс слияния ячеек имеет порог возбуждения и может возникать при наложении крупномасштабного затравочного вихревого течения [1], вызванного, например, движением воздушных масс, особенностями рельефа местности и пр. До настоящего времени попытки смоделировать процесс зарождения тайфунов относятся лишь к немногочисленным лабораторным экспериментам [2].

В работе на основе численного моделирования трехмерных конвективных течений в атмосфере воспроизведен процесс формирования мощного вихря. Вблизи дна счетной области задавались источники тепла, моделировавшие поток энергии от подстилающей поверхности океана, при этом зарождалась крупномасштабная конвективная вихревая структура, которая обладала всеми основными чертами развитого тайфуна. В численном эксперименте наблюдался так называемый «глаз тайфуна», возникали спиральные рукава, при этом основная энергия движения вихря содержалась в горизонтальном движении. Полученные поля скоростей и температур вихря качественно совпадают с данными измерений для реальных тайфунов.

1. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З. и др. // ДАН СССР. 1983. Т. 273. №3. С. 549.

2. Богатырев Г.П. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. №11. С. 557.

Влияние структурных особенностей зернистых композитов на характер процессов разрушения

А.В. Ильиных (Пермь)

Поведение зернистых композитов, находящихся в условиях сложного напряженно - деформированного состояния, зависит от таких особенностей структуры, как размеры и ориентации в пространстве анизотропных зерен, наличие пористости или других включений с иными свойствами. В работе [1] проводилось исследование зернистых композиционных материалов, которые представлялись системой структурных элементов с различными прочностными и жесткостными характеристиками. В настоящей работе структура зернистых композитов рассматривается в виде ортотропных зерен, которым соответствует система конечных элементов с характерными для зерна деформационно - прочностными свойствами.

Для оценки влияния особенностей структуры на механическое поведение зернистых композитов рассматривалась стохастическая краевая задача механики деформирования и разрушения структурно - неоднородных сред. На основе численного моделирования методом конечных элементов с использованием процедуры метода переменных параметров упругости исследовался процесс накопления повреждений зернистых композиционных материалов на структурном уровне, протекающий по различным механизмам, которые описываются совокупностью критериев прочности.

Разработаны алгоритмы компьютерного синтеза объемных случайных структур зернистых композитов с учетом заданных законов распределения параметров ориентации, размеров и формы структурных элементов. Представлены результаты численного моделирования процессов разрушения с построением равновесных диаграмм деформирования для различных видов сложного макрооднородного напряженно - деформированного состояния. Проанализированы особенности механического поведения рассматриваемых материалов на закритической стадии деформирования. Выявлено, что на такие эффективные характеристики материала, как прочность и трещиностойкость, существенное влияние оказывают сочетание вида макрооднородного напряженно-деформированного состояния и особенности структуры зернистых композитов, а также наличие пор или жестких включений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96479).

1. Вильдеман В.Э., Зайцев А.В. Равновесные процессы разрушения зернистых композитов. — Механика композиционных материалов и конструкций. 1996, Т.32, № 6, 808–817.

Гидравлическое приближение в теории расслоенных течений

А.М. Ильясов (Уфа)

Двухслойные и трехслойные ламинарные течения несмешивающихся жидкостей представляют значительный интерес при решении задач промысловой геофизики и добычи нефти с применением горизонтальных и наклонных скважин. В связи с этим возникает задача определения давления и расходных характеристик фаз по длине канала в таком расслоенном потоке.

Судя по зарубежным публикациям, подобные течения исследуются в рамках “двухжидкостной” модели [1,2], основанной на квазиодномерном приближении. Однако напряжение трения на стенках канала и на межфазных границах моделируются с помощью обычных формул для однофазного потока. Очевидно, что для расслоенных течений такая аппроксимация является не вполне корректной.

В данной работе предложена схема определения потерь давления на трение в каждой из фаз в установившемся ламинарном стратифицированном потоке с учетом изменения положения границы раздела фаз вдоль канала. Для двухслойных и трехслойных течений в плоском канале получены конечные соотношения для потерь давления на трение в каждой из фаз. На основе полученных соотношений с использованием двухжидкостной модели проведено сравнение распределения параметров течения по длине канала с результатами расчетов, проведенных с учетом соотношений для однофазного потока, а также сравнение с результатами прямого численного моделирования методом VOF (Volume of Fluid).

Установлено, что при положительных углах наклона канала практически все сечение в двухслойном потоке занимает более тяжелая жидкость. Это свидетельствует о возможности потери устойчивости границы раздела жидкостей, что может привести к образованию эмульсионного слоя. При отрицательных углах наклона наблюдается обратная ситуация. Кроме того, определено характерное расстояние, на котором происходит выравнивание границы раздела жидкостей.

Расчеты течений в каналах с переменным углом наклона к горизонту показали, что имеет место перестройка структуры потока при переходе от отрицательных углов наклона к положительным и наоборот. Эффекты перестройки структуры в трехслойном потоке еще более разнообразны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-01-97907).

1. Г. Уоллис. Одномерные двухфазные течения. 1972, М., Мир.

2. Brauner N., Moalem Maron D. Two-phase liquid-liquid stratified flow // Physico-Chem. Hrdrodynam. 1989. No. 11. P. 487-506.

Численное прогнозирование вязкоупругих характеристик однонаправленных волокнистых полимерных композитов

Е.В. Кандакова, О.Ю. Сметанников (Пермь)

Проводится исследование вычислительных аспектов решения прямых и обратных задач механики композитных материалов при использовании для этого конечно-элементного пакета ANSYS 5.5.

Формулируется и численно реализуется задача вычисления продольных и трансверсальных эффективных упругих параметров композита. Исследуется зависимость решения от числа степеней свободы модели и количества ячеек периодичности. Проводится сравнительный анализ упругих эффективных характеристик боро-, стекло-, угле- и органопластиков с тетрагональной и гексагональной укладкой и с различным объемным содержанием волокна в композите.

Рассматривается задача определения продольных и трансверсальных упругих параметров волокон, входящих в состав композиционного материала по известным свойствам композита и связующего. Разрабатывается методика решения обратной задачи механики композитов, проводится численная оценка ее корректности. Проблема сводится к минимизации функционала без ограничений. Приводится сравнение двух различных методов для вычисления упругих характеристик волокна.

Предлагается решение задачи прогнозирования вязкоупругих характеристик пластиков. По имеющимся в литературе функциям ползучести эпоксидного связующего и волокон различных типов с использованием метода переменных параметров упругости определяются функции релаксации пластиков в продольном и трансверсальном направлениях. Проводится сравнительный анализ аналогичных результатов из нескольких источников.

Разработана методика решения задач термовязкоупругости на ячейке периодичности. На базе языка APDL выстраивается многошаговый алгоритм, в основе которого лежит суперпозиция решений термоупругих краевых задач. В качестве примера приводится анализ влияния скорости изменения температуры и объемного содержания волокон на температурную деформацию ячейки периодичности.

Расчет магнито-вязкостного эффекта в рамках полидисперсной модели образования цепочечных агрегатов в магнитных жидкостях (мж)

С.С. Канторович (Екатеринбург)

Впервые явление возрастания вязкости МЖ с увеличением напряженности внешнего магнитного поля было обнаружено более 30 лет назад в экспериментах [1], показавших зависимость вязкости не только от напряженности магнитного поля, но и от направления вектора поля относительно потока. Известная теория [2] позволила описать наблюдаемый магнито - вязкостный эффект. Согласно [3,4], результаты экспериментов из [3] (резкое возрастание вязкости при нулевой скорости сдвига) не удается теоретически описать в предположении о наличии лишь одиночных частиц [2]. В работе [4] предполагалось, что на изменение вязкости влияют крупные агрегаты, образовывающиеся под действием магнитного диполь - дипольного взаимодействия. Наиболее вероятными структурами являются цепочки. Практически все известные модели образования цепочечных агрегатов в МЖ не учитывали влияние полидиспернсности на процесс объединения частиц в цепочки, за исключением [4,5], где реальная феррожидкость заменялась бидисперсной системой - крупно- и мелкодисперсной фракциями. В [4] только крупные частицы участвовали в процессе агрегирования, а мелкие выступали в качестве фона. Используя эту модель, в [4] был описан магнито - вязкостный эффект. Оказалось, что, в случае течения с нулевой скоростью сдвига, теоретический результат согласовывался с экспериментами в [3]. Однако, как было показано в [6], учет мелкодисперсной фракции в формировании агрегатов приводит к существенному уменьшению средней длины цепочек (эффект отравления). Возникает вопрос: «Если агрегаты становятся короче, не скажется ли это на реологических свойствах?». Для проверки эффекта отравления теория в [4] была расширена на случай модели [5]. Был рассчитан магнито - вязкостный эффект в модельной бидисперсной МЖ с учетом трех наиболее вероятных топологических классов цепочек (см. [6]). Оказалось, что, несмотря на уменьшение средней длины агрегатов, рост их объемной концентрации позволяет достичь экспериментально наблюдаемого возрастания вязкости.

Работа поддержана грантами РФФИ № 03-02-16115а, Президента РФ №02-15-99308м и выполнена в рамках программы НОЦ УрГУ (REC-005) при финансовой поддержке АФГИР (CRDF) и Минобразования РФ.

1. J. P. McTague, J. Chem. Phys. 51 (1969).

2. М. И. Шлиомис, ЖЭТФ, 34 (1972).

3. S.Odenbach, Magnetoviscouse Effect in Ferrofluids (Springer, 2002).

4. A.Yu. Zubarev, Lecture Notes in Physics (Springer, 2002).

5. S.S Kantorovich., A.O Ivanov., J. Magnetism Magnetic Materials, 252 (2002) 244.

6. S.S. Kantorovich, J. Magnetism Magnetic Materials, 2002, (принято в печать).

2 ½ - мерная методика расчета уравнений Максвелла в МГД приближении на квадратной адаптивной сетке

Н.Г. Карлыханов, А.В. Уракова (Снежинск)

Рассматривается неявная схема для решения уравнений Максвелла в МГД приближении в двумерном осесимметричном случае с учетом трех компонент вектора напряженности магнитного и электрических полей на квадратной адаптивной сетке. В процессе реализации данной работы особое внимание обращено на то, чтобы схема работала в областях с нулевой (малой) проводимостью. Схема имеет второй порядок аппроксимации на равномерной сетке и первый порядок аппроксимации на неравномерной сетке. Работоспособность предлагаемой схемы проиллюстрирована на решении различных задач, которые имеют аналитическое решение. Методика ориентирована на решение широкого класса задач со сложной геометрией для двумерной плоской и осесимметричной постановок.

1. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. Москва: Наука, 1980.

2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Москва: Мир, 1972.

Ориентация макроструктуры в процессе гидроэкструзии в твердой фазе

Е.И. Кароид, Е.В. Славнов (Пермь)

Авторами предложен метод определения параметра порядка ориентации макроструктуры термопластичных гидроэкструдатов. В основе предлагаемого метода лежит гипотеза подобия в изменении динамических свойств образцов с изменяющейся плотностью распределения вероятности ориентации макрочастиц и с заданной плотностью распределения при изменении их ориентации относительно оси испытаний. При исследовании вязкоупругих характеристик экструдированного поли-е-капроамида и модельного материала (стеклотекстолита) был использован фазовый метод резонансных колебаний, включающий измерение зависимости между колебаниями опоры и массы, связанными через испытуемый образец. Однако использование разработанной методологии при исследовании свойств материалов, обладающих низкой адгезией (экструдаты фторопласта Ф-4), наталкивается на ряд экспериментальных трудностей, связанных со способом крепления массы с образцом и образца с опорой. Предложен и реализован фазовый метод резонансных колебаний, отличающийся тем, что механическая система состоит из массы, закрепленной двумя идентичными вязкоупругими элементами (испытуемыми образцами), защемленными в бесконечно жесткой раме. Возбуждение продольных колебаний образцов осуществляется путем колебания опоры (рамы). Получены вязкоупругие характеристики фторопласта Ф-4 и его гидроэкструдатов для различных коэффициентов экструзии.

Имея в виду технологию получения фторопласта Ф-4 (прессование и спекание мелкодисперсного порошкообразного сырья), подобрать модельный материал для ориентированных гидроэкструдатов затруднительно. Поэтому предложено использовать тот же модельный материал и расширить рамки ранее принятой гипотезы. Интересно отметить, что при качественно различных изменениях вязкоупругих свойств поли-е-капроамида и фторопласта Ф-4 в процессе гидроэкструзии, зависимость параметра порядка ориентации их от коэффициента экструзии очень близки и в области коэффициента экструзии Кэ=2 имеют характер фазового перехода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-96485).

Поведение тел в ограниченных объемах жидкости в однородном магнитном или электрическом поле

А.С. Квитанцев, В.А. Налетова, В.А. Турков (Москва)

Исследуется поведение тел в намагничивающихся (диэлектрических) жидкостях в магнитном (электрическом) поле. В приложенном магнитном (электрическом) поле появляется сила, действующая на тело, погруженное в жидкость, и влияющая на его движение. В случае, когда жидкость однородна и занимает конечный объем, даже в однородном поле на погруженное в нее тело может действовать сила и момент силы. В связи с этим в первой части работы вычисляется сила, действующая на сферическое парамагнитное тело в сферическом сосуде с магнитной жидкостью в однородном приложенном магнитном поле в приближении феррогидродинамики (ФГД). Исследована аналогия между силами, действующими на магнит и парамагнитное тело в сосудах специальной формы (эллипсоидальной, цилиндрической формы или в плоском слое), заполненных магнитной жидкостью. На основе этой аналогии получена формула для силы, действующей на сферический магнит в сферическом сосуде с магнитной жидкостью. Показано, что парамагнитное тело, также как и магнит, может левитировать внутри сосуда с магнитной жидкостью в случае, когда магнитная проницаемость жидкости больше магнитной проницаемости окружающей среды. Аналогии между моментами сил, действующими на тело и магнит, нет. Поэтому движение магнита внутри сосуда существенно отличается от движения тела. Наличием силы, отталкивающей тела от границы магнитной жидкости, можно объяснить влияние однородного магнитного поля на реологические свойства суспензий на основе магнитной жидкости.

Используя результаты первой части работы и аналогию между уравнениями электрогидродинамики (ЭГД) и ФГД, во второй части работы вычисляется сила, действующая на тело в сосуде с диэлектрической проводящей жидкостью в однородном переменном во времени электрическом поле. Выражение для этой силы зависит от диэлектрических проницаемостей и проводимостей тела, жидкости и окружающей среды, а также от частоты электрического поля. Выведено условие возможности левитации тела в диэлектрической жидкости в однородном электрическом поле. Численное исследование показало, что с изменением частоты направление силы может меняться. Таким образом, меняя частоту, можно заставить тело либо притягиваться к границе жидкости, либо отталкиваться от нее. Описанный здесь эффект может влиять на поведение электрореологических суспензий.

Модель образования фрагментов поворота решетки и полос сдвига при холодной деформации металлов

И.Э. Келлер, П.В. Трусов (Пермь)

Объектом исследования являются металлические кристаллы, подвергаемые большим деформациям в условиях атермической пластичности. Теоретически изучается механизм образования структуры фрагментов разориентации решетки, разделенных полосами локализации деформации. Построена и изучена модель данного явления, основанная на представлении среды в виде геометрически - нелинейного упруго - пластического континуума Коссера. Точки данного континуума отождествляются с дислокационными ячейками с вмороженной в них кристаллической решеткой. Для нахождения равноактивной бифуркации однородно напряженной двумерной неограниченной среды с кубической симметрией в текущей конфигурации записывается линеаризованная постановка задачи в терминах текущего лагранжева подхода. Сразу после критического момента, когда аффинные моды деформации изолируются, нагрузку начинают воспринимать неаффинные моды, искривляющие поле спина решетки в виде пространственно-модулированных структур изгибов-кручений решетки, рисунок которых зависит от вида напряженного состояния.

Для устранения нереалистичных особенностей модели (чрезмерной размытости внутренних границ и неопределенности амплитуды и периода возникающей структуры), вызванных линеаризацией, рассмотрена модель одномерного нестабильного градиентного континуума, содержащая один управляющий параметр (приложенное напряжение), одну переменную состояния (деформацию) и нестабильность в виде катастрофы двойной складки, оправдываемая экспериментально фиксируемыми временными падениями напряжения в моменты локализации деформации, причем учтена конечная жесткость нагружения, моделирующая влияние окружения. Получено выраженное в эллиптических функциях аналитическое решение краевой задачи вблизи критической точки, показывающее образование периодической структуры локализации деформации конечной амплитуды внутри узких полос, тенденции утолщения этих полос по мере превышения критического значения, пропадание структуры при увеличении жесткости нагружения — экспериментально наблюдаемые особенности. Развитие такой структуры во времени происходит равновесно (квазистатически), но в данной ситуации соответствует необратимому (пластическому) процессу. Характерный размер структуры контролируется неоднородностью поля напряжений в исследуемом объеме и способом нагружения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-00440).

Моделирование динамики застойной зоны при расслоенном течении вязких несмешивающихся жидкостей

В.Н. Киреев (Уфа)

При использовании горизонтальных и наклонных скважин в промысловой геофизике возникает задача об определении характера течения в окрестности точки изменения направления потока. Известно, что эта область играет важную роль в определении параметров потока в связи с образованием в ней застойной (вихревой) зоны. При расслоенном течении вязких несмешивающихся жидкостей в изогнутом канале после прекращения подачи одной из жидкостей застойная зона может состоять из остаточной массы другой жидкости.

Данная работа посвящена определению закономерностей образования застойной зоны при различных режимах течения двух вязких несмешивающихся жидкостей в плоском канале. Математическая модель процесса включает полную систему уравнений Навье-Стокса с условием несжимаемости, единую для обеих жидкостей во всей области течения. Предполагается, что на границе раздела жидкостей вязкость и плотность терпят разрыв. При дискретизации уравнений математической модели используется метод контрольного объема, а для определения положения границы раздела фаз применяется метод VOF. Рассмотрена задача о течении вязкой жидкости в изогнутом канале, содержащем оторочку другой вязкой жидкости с большей плотностью.

В результате численных исследований показано, что при скоростях потока меньших, чем некоторое критическое значение, вся жидкость, первоначально сосредоточенная в оторочке, уносится потоком более легкой жидкости и застойной (вихревой) зоны при этом не образуется. Если входная скорость потока превышает критическое значение, то вблизи точки излома образуется устойчивая застойная зона, в которой циркулирует некоторая остаточная масса оторочки. Построены графики зависимости размеров застойной зоны от величины скорости на входе в канал для различных отношений коэффициентов вязкостей первой и второй жидкостей, а также изменение размеров оторочки в зависимости от времени. Установлено, что при малых числах Рейнольдса размер оставшейся части оторочки монотонно возрастает с увеличением входной скорости, стремясь к некоторому предельному значению, не превышающему размеров оторочки и зависящему от отношения характерных размеров канала и оторочки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-01-97907).

О течении жидкости с температурной аномалией вязкости

В.Н. Киреев, С.Ф. Урманчеев (Уфа)

Вязкость большинства жидкостей в широком диапазоне температур изменяется в соответствии с зависимостями Вильямса – Лэнделла – Ферри, Фулчера и рядом других. Эти зависимости представляют собой убывающие функции температуры и хорошо описывают течение жидких металлов, полимеров. Течение таких сред с учетом теплообмена было рассмотрено в работах Л.С. Лейбензона, Дж. Пирсона, С.Н. Аристова. Однако в некоторых жидкостях при нагреве могут формироваться длинные полимерные цепочки, которые при дальнейшем нагреве постепенно разрушаются. В таких жидкостях этот процесс может приводит к образованию немонотонной зависимости вязкости от температуры. Примером такой жидкости с аномальными свойствами может служить жидкая сера. В достаточно узком температурном диапазоне вязкость серы возрастает более чем в десять тысяч раз, а затем, вплоть до температур испарения, – монотонно убывает.

Математическая модель течения жидкости с аномальной зависимостью вязкости от температуры представлена уравнением Навье–Стокса для несжимаемой теплопроводной жидкости с учетом слагаемых, отвечающих за влияние изменения вязкости.

При численном решении системы уравнений модели были построены распределения полей температуры, вязкости и компонент скорости течения жидкости. При втекании нагретой жидкости в плоский охлаждаемый термостатированный канал установлено формирование “вязкого барьера” – локализованной зоны аномальной вязкости, определяющей структуру потока и величину расхода в зависимости от параметров аномалии.

Установлено, что учет теплообмена на стенках канала приводит к сложной зависимости расхода жидкости от числа Био.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-01-97907).

Моделирование формирования детонации на многопроцессорной вычислительной системе

И.А. Кириллов (Москва), Ю.А. Кондрашов, Е.В. Осинина, А.В. Панасенко, (Королев)

В последние годы вычислительному моделированию детонационных процессов уделяется достаточно большое внимание. В основном это работы, основу которых составляет использование модельных кинетических уравнений. Другим направлением является использование уравнений полной химической кинетики. Реализация последнего направления требует значительных вычислительных ресурсов, в ряде случае превосходящих ныне существующие. В настоящей работе рассматривается моделирование формирования детонации с использованием уравнений полной химической кинетики. При этом в качестве вычислительной аппаратной базы использована Российская многопроцессорная вычислительная система МВС-1000.

В настоящей работе моделирование детонации рассматривается в рамках модели “горячего пятна” для водородовоздушной смеси газов, состоящей из 9 компонент при допустимости 46 химических реакций. Основу модели течения газа составляет система уравнений многокомпонентной газовой динамики в совокупности с уравнениями неравновесной химической кинетики, записанные в декартовой системе координат в интегральной форме в виде законов сохранения массы, импульса и энергии.

Уделено внимание вопросам распараллеливания алгоритма вычислений. Показано, что для подобных задач целесообразно проводить динамическое распараллеливание с учетом фактического времени работы отдельных частей программы.

Определены границы возникновения самоподдерживающейся детонационной структуры в зависимости от начального градиента температуры.

Рассмотрен вопрос о виде начального распределения параметров в области “горячего пятна”. С этой целью проведено расчетное исследование взаимодействия взрывных волн от неточечного взрыва с плоской поверхностью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-00069).

К развитию синергетических представлений в механике динамической сверхпластичности

Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев (Бишкек)

Динамическая сверхпластичность связана со структурными изменениями различной природы. В частности, в промышленных алюминиевых сплавах эффект имеет место в условиях необратимого размытого структурного фазового перехода – динамической рекристаллизации. При этом исходная литая или деформированная структура становится равноосной ультрамелкозернистой. По существу сверхпластичность можно рассматривать как особое состояние материала в меняющихся термических и кинематических условиях.

При формулировке определяющих соотношений материал отождествляется с градиентной динамической системой, в которой смена стационарных состояний может быть проанализирована с привлечением теории катастроф. Модель, пригодная для описания сверхпластичности и пограничных областей высокотемпературной ползучести и термопластичности, включает уравнение состояния в форме минимума потенциала катастрофы сборки, а для эволюции управляющего параметра и внутренних параметров состояния предложены соответствующие кинетические уравнения.

Оценка модели с точки зрения представляющих реальный интерес физических величин осуществлена исследованием поведения термодинамических функций отклика – удельной теплоемкости и энтропии.

Показано, что функция удельной теплоемкости является непрерывной как по температурам, так и по скоростям деформации, а в режимах сверхпластичности носит пикообразный характер. С привлечением уравнения Фоккера-Планка описана суперпозиция процессов свойственного сверхпластичности механизма зернограничного проскальзывания и других форм массопереноса. Последнее подтверждает связь сверхпластичности с термодинамикой развитых фазовых переходов. Установлено, что в режимах сверхпластичности функция энтропии минимизируется. Это позволяет рассматривать процесс деформации с позиций самоорганизации диссипативных структур возрастающей сложности в неравновесных открытых системах, стремящихся в условиях, далеких от термодинамического равновесия, к минимуму энтропии. Полученным данным отвечает формирование в оптимальных термических и кинематических диапазонах равноосной ультрамелкозернистой структуры.

Оптимизация динамических свойств тонкостенных электроупругих систем

Е.П. Клигман, В.П. Матвеенко, Н.А. Юрлова (Пермь)

Использование композитов, включающих в свой состав материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами, позволяет управлять динамическими характеристиками оболочечных систем, осуществляя гашение колебаний путем диссипации энергии во внешних электрических *RLC*-цепях.

На основе общих уравнений теории упругости, записанных в системе криволинейных координат, квазистатических уравнений Максвелла для диэлектрических сред и закона Ома для переменного тока получены уравнения электроупругости оболочек, выполненных из пьезоэлектрических материалов. Показана возможность гашения механических колебаний с помощью внешних электрических цепей.

Определение динамических характеристик системы формулируется как вариационная задача на собственные значения. В найденных при этом комплексных частотах действительная часть представляет собой собственно частоту колебаний, а мнимая - показатель демпфирования. Комплексный собственный вектор содержит форму и фазу колебаний.

Расчет оболочек, содержащих слои с существенно различными физическими свойствами, осуществляется в рамках гипотезы ломаной нормали с применением шестимодальной кинематической теории оболочек для каждого слоя.

Для оценки эффективности предложенного подхода в случае оболочечных систем исследовалась возможность демпфирования первых двух мод осесимметричных форм колебаний шарнирно опертых двухслойных цилиндрических оболочек, внутренний слой которых выполнен из углепластика, а наружный - из пьезокерамики. Рассматривались варианты со сплошным и половинным пьезослоями.

Выполненные расчеты показали эффективность предложенного подхода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-01-00640).

Исследование волн цунами, вызванных метеорологическими причинами

Н.М. Клюева, А.А. Куркин (Н.Новгород)

Рассматривая цунами как один из видов разрушительных волн, нельзя не коснуться волн, обусловленных метеорологическими причинами, которые будем называть цунами метеорологического происхождения.

В данном случае речь идет о длинных и уединенных волнах, возникающих при перемещениях циклонов умеренных широт и тайфунов. Эти волны, малозаметные в открытых районах моря, при подходе к берегу резко увеличивают свою высоту и могут причинять ущерб не меньший, чем цунами, сгенерированные подводными землетрясениями, подводными оползнями, взрывами вулканов. Возникновение цунами метеорологического происхождения связано, прежде всего, со статическим эффектом неравномерности распределения давления в циклонах.

Известно, что понижение атмосферного давления на 1 мм ртутного столба вызывает повышение уровня моря на 13,6 мм и, наоборот, повышение давления на 1 мм приводит к понижению уровня на 13,6 мм. Если циклон длительное время остается более или менее стационарным, то в его центре, где давление минимальное, создается подъем в виде холма, чему способствует и система ветров, сгоняющих воду к центру циклона. При резком смещении или заполнении циклона холм под действием силы тяжести начнет оседать, возбуждая свободные волны, длина которых соизмерима с размерами циклона. При благоприятных условиях возникший холм может смещаться в виде уединенной волны, постепенно оседая без образования обычных поперечных волн.

Наиболее часто цунами метеорологического происхождения имеют характер вынужденной барической волны с длиной, равной удвоенному диаметру вызвавшего её циклона, и скоростью перемещения, соответствующей скорости перемещения циклона.

Впервые барическую волну в циклоне удалось непосредственно проследить во время урагана 4 ноября 1957 года, прошедшего вдоль побережья Англии (наблюдалась волна высотой более 2 м). Наиболее катастрофическое действие таких цунами наблюдался в Бенгальском заливе 7 октября 1737 г. Большой силы циклон, двигавшийся перпендикулярно берегу, вызвал волну высотой 13 м (погибло более 300 тыс. человек).

В данной работе рассматриваются цунами, вызванные метеорологическими причинами. Исследуется влияние скорости атмосферной волны на их трансформацию на мелководье.

Математическая модель процессов тепло – и массопереноса полимера в канале пластицирующего экструдера

Л.А. Ковригин, Н.М. Труфанова, А.Г. Щербинин, В.И. Янков (Пермь)

Переработка полимерных материалов и создание необходимого для этого оборудования представляет одно из важнейших направлений развития современной промышленности. Наиболее широкое применение среди машин, используемых при переработке пластических масс, нашли одночервячные экструдеры. В работе предлагается трехмерная математическая модель процессов тепломассопереноса в канале винта, охватывающая все зоны, начиная от зоны загрузки и заканчивая зоной дозирования. Модель учитывает нелинейность свойств материала, вынужденную конвекцию расплава полимера в условиях фазового перехода, влияние потока утечек расплава полимера через зазор между гребнем нарезки червяка и внутренней поверхностью корпуса на работу экструдера.

В настоящее время существуют две основные группы физических моделей плавления полимера в пластицирующих экструдерах: модели пленочного механизма плавления и модели пробкового механизма плавления. По первой модели происходит постоянная деформация пробки. Вторая модель – бездеформационная. В данной работе предложена пространственная математическая модель этой зоны, построенная на основе анализа результатов экспериментальных работ и учитывающая оба механизма плавления полимера. Проведено исследование влияния этих механизмов на работу экструдера: длину зоны плавления; развиваемое экструдером давление.

Представленная модель позволяет получать наиболее полную картину процесса переработки полимеров на одночервячных экструзионных агрегатах с учетом геометрических, технологических параметров, свойств перерабатываемого материала, а также реализуемого в шнеке температурного поля.

Моделирование температурного поля пластицирующего экструдера

Л.А. Ковригин, А.Е. Терлыч, А.Г. Щербинин (Пермь)

Математическая модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, замкнутую граничными условиями. Условно в экструдере можно выделить зоны: загрузки, плавления, дозирования и формующий инструмент. Давление рассчитывается с момента достижения пленкой расплава полимера двукратной величины зазора между гребнем шнека и цилиндром. Учитываются нелинейные теплофизические и реологические свойства полимера. Использовался метод конечных разностей. Система нелинейных дифференциальных уравнений решалась методом Гаусса-Зейделя, для линеаризации системы уравнений использовался метод секущих модулей. Учитывалась диссипация тепла в полимере и противоток через гребень. Процессы тепломассопереноса осуществлялись совместно, в результате чего находилась рабочая точка. Порядок расчета: 1) задавалась производительность экструдера; 2) задавалась скорость вращения шнека; 3) производился полный расчет экструдера и проверяется давление на выходе рабочего инструмента, в случае отклонения от атмосферного повторяется пункт 2 с измененной скоростью. Итерационный процесс завершался, когда давление на выходе рабочего инструмента равнялось атмосферному.

В случае, когда температура полимера в экструдере превысит допустимую, весь расчет выполняется заново с измененной температурой корпуса в соответствии с определенным шаблоном. Температура шнека определялась методом контурных токов, для чего экструдер был разбит на элементарные ячейки по радиусу и длине. Показано, что температура шнека мало отличается от температуры цилиндра за счет хорошей теплопроводности пленки полимера, которая находится между цилиндром и гребнем шнека.

Рассмотренная модель предназначена для автоматизированного управления производительностью экструдера с выдачей информации оператору - технологу о состоянии технологического процесса: температурные поля в полимере, недоступные непосредственному наблюдению, и предупреждение о деструкции; давление и градиент давления вдоль шнека и предупреждение о несоответствии давления норме; форма плавящейся пробки и предупреждение о заклинивании.

В результате численного моделирования получены зависимости производительности от числа оборотов шнека, зазора, температуры цилиндра и вязкости. Определена мощность, затрачиваемая на вращение шнека, и ее распределение по длине шнека. Найдены температурные шаблоны корпуса экструдера, которые применяются в итерационном процессе поиска заданной производительности с учетом отсутствия деструкции полимера.

Структура холестерического жидкого кристалла в акустическом переходе Фредерикса за порогом эффекта

Е.Н. Кожевников (Самара)

Жидкие кристаллы демонстрируют разнообразие пространственно - модулированных диссипативных структур (доменов), которые могут возникать в них при периодической деформации кристалла в осциллирующих потоках, вязких волнах, звуковом поле. Вид доменов в них зависит от исходной ориентации кристалла, геометрии жидкокристаллической ячейки, типа и частоты воздействия. Теоретическое описание доменных структур на низких частотах на основе уравнений нематодинамики Лесли-Ериксена и на высоких, с привлечением релаксационных эффектов, во всех ранее опубликованных работах сводится к определению пороговой интенсивности воздействия и геометрии доменов на пороге эффекта. Гораздо больший интерес представляет описание доменной структуры кристалла за порогом эффекта, определение степени деформации кристалла в доменах, изменение геометрии искажений с увеличением интенсивности воздействия, а также иерархии вторичных структур. В настоящей работе предлагается теоретическое описание эволюции пространственно - модулированной структуры в слое холестерического жидкого кристалла (ХЖК) при воздействии на него ультразвуковой волны с интенсивностью, превышающей пороговую. В основе описания лежат уравнения гидродинамики ХЖК, учитывающие процессы структурной релаксации, существенные на ультразвуковых частотах. Степень деформации структуры в доменах и их геометрия за порогом эффекта анализируются методом возмущений, для чего выведенные ранее в линейном по искажениям структуры варианте [1] уравнения динамики ХЖК дополнены нелинейными слагаемыми. Построена скэйлинговая зависимость размера доменов и амплитуды деформации структуры от относительной интенсивности звуковой волны и предварительного растяжения ХЖК – слоя. Показано, что за порогом эффекта устойчивым возмущениям структуры соответствует интервал значений волновых чисел, нарастающий при продвижении за порог, а наиболее вероятный размер доменов должен уменьшаться при продвижении с увеличением интенсивности воздействия. Последний результат коррелирует с данными эксперимента [2]. Отмечено уменьшение скорости нарастания деформации в доменах с интенсивностью ультразвука, что отражает уменьшение относительной роли звукового воздействия в формировании доменной структуры при предварительного растяжение слоя.

1. Кожевников.Е.Н.// Акуст. Журн. 2020. Т.48. N6. С . 777-787.

2. Гурова И.Н, Капустина О.А..// Акуст. Журн. 1997. Т.43. N3. С .338-343.

Исследование движения изотермической жидкости в полости прямоугольного сечения, совершающей вращательные вибрации

В.Г. Козлов, Н.В. Селин (Пермь)

Экспериментально исследуется осредненное движение изотермической жидкости в полости прямоугольного сечения при вращательных вибрациях. Наряду с областью высоких и умеренных частот значительное внимание уделяется области низких безразмерных частот, при которых толщина слоев Стокса сравнима с размером полости. В этом последнем случае осциллирующее движение жидкости определяется вязкими силами во всем объеме полости. Эксперименты проводятся на вязких жидкостях (глицерин, силиконовое масло). Структура и интенсивность течения исследуются методом фото- и видеорегистрации с последующей обработкой фотографий и видеозаписей.

Наблюдения показывают, что на фоне осцилляций жидкости, вызванных вращательными качаниями, в полости формируется осредненное движение, которое локализуется вблизи торцовых стенок и распространяется на несколько калибров вглубь канала. В пределе низких частот течение состоит из четырех плоских вращающихся вихрей, которые охватывают всю торцовую область. Два вихря сравнительно небольшого размера локализованы непосредственно у торцовой грани, а два больших образуют в середине слоя течение, направленное к торцовой стенке. Течение симметрично относительно середины слоя, вихри вращаются согласованно, образуя непосредственно вблизи торцовой грани две струи, направленные в углы. При повышении безразмерной частоты вибраций поперечные размеры вихрей уменьшаются, вихри прижимаются к стенкам полости и над ними образуется система из валов, вращающихся в противоположных направлениях. Вихревое течение приобретает двухэтажную структуру. При дальнейшем повышении частоты вибраций локализованные в вязких скин-слоях вихри становятся неразличимыми, все поперечное сечение канала занимают внешние по отношению к слоям Стокса конвективные течения, называемые в литературе "акустическими".

В работе изучены закономерности трансформации структуры осредненного течения по мере понижения частоты и зависимость интенсивности вибрационного течения от вибрационных параметров в предельном случае низкой безразмерной частоты.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 00-01-00416а).

Исследование осредненного движения жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре

В.Г. Козлов, А.В. Чиграков (Пермь)

Экспериментально изучается движение жидкости в горизонтальной цилиндрической полости, совершающей быстрое вращение вокруг своей оси. Под действием центробежной силы жидкость, заполняющая полость частично, центрифугируется и распределяется на поверхности полости в виде цилиндрического слоя. При этом жидкость движется относительно стенок полости в направлении, противоположном вращению. Проведено исследование скорости и структуры осредненного течения от частоты вращения, размеров полости и относительного наполнения. Найдены безразмерные параметры, определяющие интенсивность течения. Показано, что движение связано с действием силы тяжести, которая вызывает вынужденные колебания жидкости - по свободной поверхности слоя жидкости в системе отсчета полости распространяется волна в азимутальном направлении, обратном вращению; волна генерирует азимутальное осредненное течение.

Обнаружено, что при определенных условиях осредненное течение имеет вид регулярной системы тороидальных вихрей с пространственным периодом, значительно превосходящим толщину слоя. Определена область существования трехмерных потоков. Показано, что пороговое возникновение трехмерных структур связано с резонансным возбуждением собственных колебаний свободной поверхности жидкости (центробежных волн) во вращающейся системе отсчета. Порог возбуждения колебаний зависит от относительного наполнения полости. Возбуждение колебаний значительно интенсифицирует осредненное течение. Структура трехмерного вибрационного течения исследована в зависимости от относительной длины цилиндрической полости. Результаты измерения периода осредненных трехмерных вибрационных течений согласуются с результатами известных теоретических исследований центробежных волн.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 00-01-00416а).

Инициализация счета турбулентного перемешивания на основе уравнения для амплитуды возмущения

В.И. Козлов , И.В. Сапожников (Саров)

В одномерном приближении рассмотрено турбулентное перемешивание, возникающее вследствие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на контактной границе разноплотных газов. Представлены результаты расчетов с использованием стандартного и модифицированного вариантов модели Никифорова. В модифицированном варианте физически более корректно учитывается влияние пульсаций плотности и, в частности, выполняется предельный переход к случаю однокомпонентной несжимаемой среды, в которой пульсации плотности отсутствуют.

В случае стандартного варианта модели счет турбулентного перемешивания инициализировался заданием начальных значений пульсаций плотности в нескольких точках слева и справа от контактной границы. В модифицированном варианте задавались начальные значения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии турбулентности, которые определялись в первом порядке теории возмущений. При этом начальная ширина зоны перемешивания и время начала счета турбулентного перемешивания задавались из условия достижения критического значения числа Рейнольдса, определенного по амплитуде возмущения и скорости ее роста. Указанные величины рассчитывались в автономных программных блоках, реализованных в методике ВИХРЬ.

1. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. - М.: Физматгиз, 1963 г.

2. Андронов В.А., Козлов В.И., Никифоров В.В., Разин А.Н., Юдин Ю.А. Методика расчета турбулентного перемешивания в одномерных течениях (методика ВИХРЬ). // Вопросы атомной науки и техники, сер.: Математическое моделирование физических процессов, 1994 г., вып. 2, стр. 59÷64.

3. Никифоров В.В. Турбулентное перемешивание на контактной границе разноплотных сред. // Вопросы атомной науки и техники, сер.: Теоретическая и прикладная физика, 1985 г., вып. 1, стр. 3÷8.

4. Иногамов Н.А., Демьянов А.Ю., Сон Э.Е. Гидродинамика перемешивания. - М.: издательство МФТИ, 1999 г.

5. F. Poggi, M.-H. Thorembey, G. Rodriguez Velocity measurements in gaseous mixtures induced by Richtmyer-Meshkov instability. // Physics of Fluids, v. 10, № 11, 1998, pp. 2698-2700.

6. Андронов В.А., Мешков Е.Е., Никифоров В.В. и др. Экспериментальное исследование и численное моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях. // Доклады АН СССР, 1982 г., т. 264, № 1, стр. 76.

Выбор предпочтительного решения для задачи об одноосном растяжении цилиндра из жесткопластического материала

О.В. Козлова (Комсомольск-на-Амуре)

Исследуется решение задачи об одноосном растяжении цилиндра из жесткопластического материала в условиях осесимметричной деформации. В рамках теории идеального жесткопластического тела [1] данная задача имеет неединственное решение. Для выбора предпочтительного решения используется критерий выбора, сформулированный на базе общих термодинамических и экспериментальных закономерностей.

В задаче об одноосном растяжении цилиндра с непрерывным полем скоростей перемещений может быть построено бесчисленное множество решений. Рассмотрим решение задачи для однородного [2] и для неоднородного поля скоростей перемещений [3]. Для выбора предпочтительного решения используем следующие критерии выбора:

- пластическое течение развивается таким образом, что максимальная деформация минимальна (в качестве меры деформаций выбран тензор конечных деформаций Альманси);

- пластическое течение развивается таким образом, что приращение работы, необходимой для деформирования тела, максимально.

Предпочтительным решением оказывается решение для однородного поля скоростей перемещений, так как согласно критерию выбора в однородном поле скоростей перемещений деформации накапливаются медленнее, а приращение работы будет больше.

1. Хромов А.И. Деформация и разрушение жесткопластических тел. Владивосток: Дальнаука, 1996, 181с.

2. Шилд Р.Т. О пластическом течении металлов в условиях осевой симметрии. Механика: сб. переводов, 1957, №2, с.102-122.

3. А.И. Хромов, О.В. Козлова. Деформация полого цилиндра при одноосном растяжении. Вестник КнАГТУ, выпуск 2, Прогрессивные технологии в машиностроении, сборник 1, часть 3, Комсомольск-на-Амуре, 2000, с.15-18.

Электровихревое течение в прямом плоском канале с ферромагнитными сердечниками

И.В. Колесниченко, С.Ю. Хрипченко (Пермь)

В данной работе исследуется течение электропроводной жидкости в длинном канале. У канала прямоугольное поперечное сечение, причем ширина намного больше толщины. Через канал течет электрический ток. Вихревые электромагнитные силы возникают вследствие взаимодействия электрического тока и магнитного поля тока, которое усиливается в зазоре между надетыми на канал ферромагнитными сердечниками. Электромагнитные силы лежат в плоскости канала и направлены перпендикулярно его длинным стенкам. Под действием этих сил возникает электровихревое течение (ЭВТ) жидкости.

В стопорном режиме (когда закрыты вход и выход канала), если сердечники расположены перпендикулярно длинным стенкам, то возникает симметричное ЭВТ, которое не вызывает перепад давления между входом и выходом. Если же сердечники расположить под углом, то в стопорном режиме может возникнуть перепад давления из-за несимметрии ЭВТ. Если через канал организовано транзитное течение под действием внешнего перепада давления, то при некоторых значениях параметров, ЭВТ может так исказить линии тока, что вдоль них появится проекция электромагнитных сил. Такое нелинейное взаимодействие электровихревого и транзитного течений может привести к снижению гидравлического сопротивления канала, что выражается либо в увеличении расхода через канал при заданном внешнем перепаде давления, либо к уменьшению перепада давления при заданном расходе. Другими словами, в канале возникнет «насосный» эффект.

Этот эффект исследуется теоретически и экспериментально. Теоретическая часть заключается в численном исследовании математической модели процессов в канале. Модель построена на основе уравнений магнитной гидродинамики в приближении плоского слоя и в безындукционном приближении. Исследования показали, что эффект возникает в узком диапазоне параметров. На него влияют размеры, форма, количество и порядок расположения сердечников, а также их угол наклона к длинной стенке канала. Для экспериментального исследования выполнена установка, состоящая из канала, токоподводящих электродов, и ферромагнитных сердечников. Внешний постоянный перепад давления обеспечивается сосудом Менделеева. На выходе из канала измеряется расход.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ №2021 и при поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009-0).

Влияние пространственной неоднородности нагрева на генерацию крупномасштабного спирального вихря

И.В. Колесниченко, Г.В. Левина, А.Н. Сухановский (Пермь)

В данной работе исследовался вращающийся слой жидкости, подогреваемый в центральной области. В отсутствие вращения наблюдались три типа конвективных структур. Горизонтальный перепад температуры приводит к появлению крупномасштабного адвективного течения: осредненный подъем жидкости над нагревателем, дивергентное растекание с опусканием жидкости у вертикальных стенок кюветы и конвергентное течение в нижних слоях к центру кюветы. Течение над нагревателем состоит из хаотически всплывающих термиков, вне зоны подогрева образуется система конвективных валов.

При вращении слоя на жидкость начинает действовать сила Кориолиса. В результате ее действия в нижних слоях, где поток жидкости направлен к центру, жидкость закручивается в направлении вращения кюветы, циклонически. В верхних слоях, где движение направлено от центра, поток закручивается антициклонически. Если число Грасгофа выше некоторого критического значения, то в центре полости зарождается спиральный циклонический вихрь пронизывающий всю толщину слоя.

Для нагрева использовались нагреватели двух типов, с однородным и неоднородным распределением температуры. Получены экспериментальные зависимости критического числа Грасгофа от числа Рейнольдса для нагревателей обоих типов. Показано, что в случае однородного распределения температуры на нагревателе генерация вихря происходит при более высоких критических числах Грасгофа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-05-64232, № 02-05-062-09, № 02-05-062-10, РФФИ-Урал № 01-01-96482), а также при поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009-0).

Теплофизические и механические свойства ДУКМ на основе меди

Г.Л. Колмогоров, А.С. Мокрецов, Т.А. Ульрих (Пермь)

К дисперсноупрочненным относят композиционные спеченные материалы, содержащие искусственно вводимые высокодисперсные, равномерно распределенные частицы фаз, не взаимодействующих активно с матрицей и не растворяющихся в ней до температуры плавления [1].

Исследования в области контактной сварки привели к разработке и внедрению в промышленность перспективного класса дисперсноупрочненных композиционных материалов (ДУКМ) на основе порошковой меди. Испытания показали, что стойкость электродов из ДУКМ в сварочном производстве в несколько раз выше по сравнению с электродами из традиционно применяемых литых бронз.

Для математического моделирования процесса контактной точечной сварки требуется знание теплофизических констант новых материалов. Были исследованы основные теплофизические характеристики материала КМ-4-р и сопоставлены с полученными ранее характеристиками этого же и других ДУКМ полученных по традиционной технологии, а также с чистой медью.

Исследование теплоемкости и теплопроводности материала проводилось в интервале температур 25-400 ^{o}C. По своим значениям и по характеру кривой теплоемкости материал КМ-4-р ближе всего к чистой меди, хотя и имеет несколько более сложную зависимость от температуры. Результаты испытаний на теплопроводность КМ-4-р существенно не отличаются от исследованных ранее материалов. Характерным для полученных зависимостей является интенсивное снижение теплопроводности с повышением температуры до 200 ^{o}C и стабилизация значений λ при более высоких температурах.

Наряду с вышеуказанными характеристиками были проведены испытания на одноосное растяжение и сжатие в условиях повышенных температур материалов КМ-4 и КМ-25. При комнатной температуре материалы обладают весьма значительным уровнем прочности для композита на основе меди. С ростом температуры предел прочности монотонно снижается. Однако по отношению к прочности материала матрицы, данная характеристика линейно возрастает. Пластичность материалов достаточно ограничена, что объясняется технологией производства порошковых материалов. С ростом температуры данная характеристика монотонно убывает, причем пластичность материала КМ-4 более чувствительна к изменению температуры в интервале 20-400 ^{o}C.

1. Анциферов В. Н., Бобров Г.В. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М., 1987. 792 с.

Локализация пластического течения в ГПУ - сплавах циркония

С.В. Колосов, Г. Н. Нариманова, Т.М. Полетика (Томск)

В данной работе исследован характер локализации деформации в промышленных сплавах циркония Э110 (Zr-1%Nb) и Э635 (Zr - 1%Nb - 1.3%Sn - 0.4%Fe), применяемых для изготовления труб тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Интерес к этим ГПУ сплавам вызван тем, что характер их деформации и поведение кривых пластического течения слабо изучены. Тем не менее эти данные необходимы для выяснения закономерностей эволюции локализации пластической деформации на макро- и микроуровнях, ведущих к образованию очага разрушения, в частности, для оценки запаса технологической пластичности данных сплавов.

Плоские образцы испытывали растяжением на испытательной машине “Instron-1185” при скорости перемещения подвижного захвата 0.1 мм/мин. Одновременно с записью диаграммы деформации методом спекл-интерферометрии фиксировались поля векторов смещений. Электронно – микроскопические исследования проводили на электронном микроскопе ЭВМ- 125К.

Установлено, что кривые пластического течения рекристаллизованных сплавов циркония Э110 и Э635 являются многостадийными, причем параболическая стадия состоит из пяти подстадий, с постоянно убывающим показателем параболичности.

Методом лазерной спеклинтерферометрии установлены картины распределения фронтов локальных удлинений ε_{xx} на каждой стадии кривой нагружения вплоть до образования шейки. Это позволило исследовать кинетику образования шейки в циркониевых сплавах с разными составом и структурой. Так, установлено, что скорость движения фронтов локализации деформации к месту будущей шейки зависит от показателя параболичности: чем ниже n, тем выше скорость движения фронтов локализации, при этом скорость образования шейки определяется величинами предела прочности и общей деформации до разрушения.

В результате направленного движения деформационных фронтов к одному очагу локализации и слияния с ним происходит периодическое накопление в нём деформации, что проявляется в более быстрой смене дислокационных субструктур вплоть до образования фрагментированной структуры, наблюдаемой при формировании шейки.

Таким образом, развитие пластической деформации представляет собой сложный процесс самосогласованного зарождения и движения локализованных очагов пластического течения. При этом кинетика развития локализации определяет закономерности эволюции микроструктуры, обуславливающие образование очага разрушения.

Разработка пакета программ для описания закономерности пластической деформации в ГЦК материалах

С.Н. Колупаева, М.Е. Семёнов (Томск)

Эффективным путем исследования пластической деформации служит сочетание реального физического эксперимента с математическим моделированием и вычислительным экспериментом. Цель данной работы - разработка пакета прикладных программ, позволяющего проводить имитационное моделирование пластической деформации в ГЦК материалах. Математическая модель пластической деформации в материалах, основанная на концепции упрочнения и отдыха, включает три блока дифференциальных уравнений, описывающих: 1) баланс деформационных дефектов (дислокации различного типа, точечные дефекты); 2) отклик материала на деформирующее воздействие (скорость пластической деформации); 3) внешнее воздействие на материал. В качестве переменных, характеризующих дефектную среду материала, выбраны: сдвигообразующие дислокации, призматические дислокационные петли межузельного типа и вакансионного типа, дислокации в дипольных конфигурациях вакансионного типа и межузельного типа, межузельные атомы, моновакансии и бивакансии. Уравнение для скорости деформации связывает переменные, характеризующие деформирующее воздействие и деформационную дефектную подсистему кристаллического тела, с количественной характеристикой отклика материала на деформирующее воздействие - скоростью деформации.

В работе предложен метод, суть которого заключается в планировании эксперимента через выбор как параметров материала, обеспечивающих необходимые характеристики, так и параметров численного эксперимента. При записи системы уравнений баланса деформационных дефектов учитываются добавки к скорости образования линейных и точечных дефектов в виде функций релаксаций.

Все модули пакета прикладных программ написаны на алгоритмическом языке программирования C++. Комплекс работает под управлением операционной системы Windows.

Исследование закономерностей пластической деформации скольжения в ГЦК монокристаллах

С.Н. Колупаева, С.И. Пуспешева (Томск)

Пластическая деформация скольжения – сложный процесс, существенно зависящий от состояния дефектной подсистемы деформируемого кристалла, которое, в свою очередь, определяется образованием, движением и аннигиляцией дефектов кристаллической решетки.

Для исследования основных закономерностей пластической деформации скольжения, использована математическая модель кинетики пластической деформации скольжения для ГЦК материалов, включающая три блока уравнений, которые описывают: 1) внешнее воздействие, 2) отклик материала на деформирующее воздействие (скорость деформации) и 3) баланс деформационных дефектов. Среда деформационных дефектов характеризуется сдвигообразующими дислокациями, дислокациями в дипольных конфигурациях вакансионного и межузельного типа, межузельными атомами и вакансиями. В качестве базового структурного элемента при записи явного вида уравнений рассмотрена зона кристаллографического сдвига. Зоны сдвига, формируясь в результате активности дислокационных источников и внутризонных междислокационных взаимодействий, создают совместным действием некоторую среду линейных и точечных деформационных дефектов деформируемого кристаллического тела. Эта среда, в свою очередь, взаимодействует с дислокациями, образующими зоны сдвига, оказывая на них существенное и разнообразное влияние. Предполагается, что процесс деформации во всех действующих системах скольжения осуществляется в идентичных зонах сдвига, и система дефектов, сконцентрированная в зонах сдвига, заменяется однородной деформационно - дефектной средой, которая содержит столько же дефектов каждого типа, как все зоны вместе взятые. Все параметры модели имеют ясный физический смысл и могут быть вычислены.

В работе проведён вычислительный эксперимент для описания основных закономерностей пластической деформации и изменения составляющих дефектной подсистемы ГЦК монокристаллов в условиях деформации с постоянной скоростью деформирования, ползучести при постоянном напряжении и постоянной нагрузке в условиях растяжения и сжатия.

Использование многопроцессорной вычислительной системы МВС - 1000 для решения трехмерных контактных задач упругих слабосжимаемых тел при конечных деформациях

А.С. Кольцов (Пермь)

Разработан алгоритм численного решения трехмерных контактных задач слабосжимаемых упругих тел при конечных деформациях, использующий методику параллельных вычислений. Алгоритм реализован на многопроцессорной вычислительной системе МВС-1000. Проведено тестирование алгоритма на плоских и осесимметричных задачах с известными решениями. Исследовано влияния количества используемых процессоров системы МВС-1000 на время счета.

Работа является продолжением исследования [1], в котором механическое поведение композита моделировалось на ячейке в форме цилиндра (матрица) с вклеенным жестким шаровым включением. Основными недостатками такой постановки задачи являлось пренебрежение реальными областями матрицы (объемная доля которых составляет 9%), а также то, что матрица могла находиться только в приклеенном или в оторванном от включения состоянии, и контакт оторванных областей матрицы с включением не допускался.

В настоящей работе используется более реалистичная модель: гексагональная ячейка (матрица) с вклеенным или с изначально плотно вложенным (в зависимости от реализации) жестким шаровым включением. При нагружении ячейки с изначально плотно вложенным включением упругая матрица может как выходить из контакта, так и вступать впоследствии в контакт с включением. Ячейка растягивается вдоль ее оси симметрии.

Проведено численное исследование ячеек с вложенным и с вклеенным включением при различных величинах объемной доли твердой фазы. Показано, что реальная ячейка примерно в 1,11 раза жестче ранее применявшегося аналога.

Проведено сравнение различных цилиндрических аналогов с реальной ячейкой. В качестве критерия сравнения принималась интегральная сила сопротивления ячейки растяжению. Получено, что наиболее приемлемым является аналог, в котором реальный объем матрицы заменяется вписанным цилиндром, а размер включения выбирается из условия сохранения отношения объема включения к полному объему модельной ячейки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Научно – Образовательного центра «Неравновесные переходы в сплошных средах» (грант № 02-01н-023а) и РФФИ (грант № 02-07-90305).

1. Moshev V.V., Kozevnikova L.L. Predictive potentialities of a cylindrical structural cell for particulate elastomeric composites.// Int. J. Solid and Structures. 2000. V. 37, P. 1079 - 1097.

Моделирование вязкоупругих свойств и эффекта размягчения эластомерного материала

Д.В. Комар, Л.А. Комар (Пермь)

Из экспериментов, проведенных с наполненными резинами, известно, что после первого цикла последующие кривые растяжения - сжатия идут существенно ниже. Наблюдаемое явление размягчения обычно связывают со структурными изменениями, происходящими на границе “каучук - активный наполнитель”. Но в литературе известны экспериментальные данные, когда эффект размягчения наблюдается в ненаполненных эластомерах и носит релаксационный характер [1]. В этом случае включаются механизмы структурной перестройки в каучуковой матрице.

Для моделирования явления размягчения предлагается математическая модель, использующая представление о перестройке структуры эластомерной сетки. Для описания свободной энергии полимерных цепей используется модель цепи, состоящей из конечного числа свободно - сочлененных звеньев. В работе рассматривается полимерная сетка, в которой увеличивается средняя длина полимерных цепей, ориентированных вдоль оси нагружения материала, и уменьшается длина цепей, ориентированных в перпендикулярном направлении [2].

На первом этапе модель применялась для моделирования численного эксперимента, имитирующего одноосное нагружение эластомерного материала с постоянной скоростью движения захватов как в условиях нагружения, так и в режиме разгрузки. Расчеты показали такую же качественную зависимость напряжений от деформаций, какая наблюдается при реальных испытаниях образца. Следующим шагом использования модели было описание тиксотропных свойств. Известно, что после отдыха или термостатировании наблюдается повышение жесткости образцов, связанное с обратимыми изменениями структуры материала. Введение в модель тиксотропных параметров позволило описать реальное поведение эластомерных материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96404).

1. J. A. C. Harwood, L. Mullins, A. R. Payne. Stress softening in natural rubber vulcanizates // J. Appl. Pol. Sci. – 1965. – V 9. – pp. 3011-3021.

2. Свистков А. Л., Комар Л. А., Комар Д. В. Моделирование поведения эластомеров с ориентационной перестройкой структуры полимерной сетки под действием нагрузки // М., НИИШП, XIII Симпозиум “Проблемы шин и резинокордных материалов" – 2002. – Т. 2. – с. 88-92.

Напряженно-деформированное состояние цилиндра и трубы при кручении с большими пластическими деформациями

А.В. Коновалов (Екатеринбург)

Излагается постановка и результаты решения квазистатических задач кручения круглого цилиндрического стержня и трубы из упругопластического материала с большими пластическими деформациями. В отличие от классических решений допускается возможность цилиндра и трубы однородно удлиняться или укорачиваться вдоль продольной оси *z*. Нормальная составляющая поверхностных сил в актуальной конфигурации на торцевой поверхности взаимно уравновешена, напряжения и деформации зависят только от радиуса *r*. Решение выполнено методом конечных элементов на базе принципа виртуальной мощности в скоростной форме.

На начальной стадии кручения при упругих деформациях цилиндр и труба удлиняются (эффект Пойнтинга). По мере появления и роста пластических деформаций удлинение переходит в сжатие. Чем тоньше стенка трубы, тем больше удлинение трубы и меньше интенсивность ее последующего сжатия. Степень удлинения и сжатия вдоль продольной оси зависит от интенсивности упрочнения материала при пластической деформации. Рассмотрены кручение цилиндра с приложенной вдоль продольной оси постоянной нагрузкой и знакопеременное кручение за три цикла.

При малых углах закручивания в центральной области цилиндра напряжение σ_{zz} - растягивающее, а в области, прилегающей к свободной поверхности, - сжимающее. Модуль шарового тензора положителен во всех точках радиуса цилиндра. При большом угле закручивания напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz}, σ_{rr} имеют близкие между собой значения одного порядка со сдвиговым напряжением $\sigma_{\varphi z}$. В центральной части цилиндра они - сжимающие и по модулю значительно превышают сдвиговое напряжение.

При больших углах закручивания тонкостенной трубы напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz}, σ_{rr} на порядок меньше, чем сдвиговое напряжение. Модуль шарового тензора во всех точках радиуса стенки трубы положителен.

При кручении толстостенной трубы на большой угол напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz}, σ_{rr} имеют близкие между собой значения одного порядка со сдвиговым напряжением $\sigma_{\varphi z}$ (аналогично кручению цилиндра). В области, прилегающей к внутренней стенке трубы, они - сжимающие и по модулю превышают напряжение $\sigma_{\varphi z}$. Однако, в отличие от цилиндра, значения этих напряжений по модулю резко уменьшаются при приближении к внутренней стенке трубы.

Колебания сферической жидкой капли, окруженной неконцентрическим сферическим слоем другой жидкости

В.В. Коновалов, Т.П. Любимова (Пермь)

Одним из методов определения коэффициента поверхностного натяжения является измерение собственных частот свободных капиллярных колебаний капли жидкости [1, 2]. Если жидкость невязкая, невозмущенная капля имеет сферическую форму, а амплитуда колебаний много меньше размера капли, то коэффициент поверхностного натяжения может быть вычислен по формуле Релея [3]. Различные факторы могут привести к отклонению частот, рассчитанных по формуле Релея при заданном коэффициенте поверхностного натяжения, от реально наблюдаемых собственных частот.

С помощью измерения собственных частот капиллярных колебаний может быть также определено поверхностное натяжение на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей, для случая двухслойной системы, состоящей из сферической жидкой капли, окруженной сферическим слоем другой жидкости [4]. Если система концентрична, жидкость невязкая, а амплитуда колебаний много меньше размеров капли и сферического слоя, то собственная частота каждой моды колебаний определяется решением биквадратного уравнения [5].

В настоящей работе найдена поправка к собственной частоте, вызванная малой неконцентричностью системы. Показано, что эта поправка имеет второй порядок малости по параметру неконцентричности системы, который определяется как отношение расстояния между центрами капли и слоя окружающей жидкости к радиусу внешнего слоя. Неконцентричность системы приводит к тому, что собственные частоты становятся зависящими от абсолютного значения азимутального числа моды свободных колебаний.

Первоначально для решения задачи был опробован метод многих масштабов. Однако выражение для поправки собственной частоте содержит определители матриц четвертого и пятого порядка, раскрытие которых приводит к трудностям в оптимизации последовательности вычислений. Поэтому в дальнейшем использовался иной метод нахождения поправки. Матрица задачи раскладывалась в ряд по поправке к собственной частоте, которая затем находилась из решения задачи на собственные значения.

1. Sauerland S., Eckler K., Egry I.// J. Mater. Sci. Lett. 1992. V. 11. P. 330.

2. Gorges E., Egry I.// J. Mater. Sci. 1995. V. 30. P. 2517.

3. Rayleigh Lord// Proc. R. Soc. Lond. 1879. V. 29. P. 71.

4. Egry I.// J. Mater. Science. 1991. V. 26. P. 2997.

5. Saffren M., Elleman D.D., Rhim W.K. // Proc. of the Second International Colloquium on Drop and Bubbles, edited by D. H. Le Croissette (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1982). P. 7-14.

Предотвращение ползучести льда при бурении глубоких скважин в ледовых отложениях

Н.С. Кононова (Санкт-Петербург)

При проходке глубоких скважин в толще соляных месторождений и, особенно, в мощных ледовых отложениях значительные затруднения возникают при поддержании открытого ствола скважины в силу проявления специфических вязко - пластичных свойств этих горных пород.

В настоящее время существуют многие способы борьбы с заплыванием полости скважины при бурении, среди которых можно отметить выполнение борозд в стенках скважин, параллельных ее оси, а также заполнение скважины заливочной жидкостью определенной плотности на необходимую высоту.

Более эффективно и надежно заполнение скважины незамерзающими заливочными жидкостями, так как температура стенок скважин в ледовых отложениях достаточно низкая: например, температура льда на станции Восток (Антарктида) имеет значение до минус 55-57^{0}С на глубине 20-50 м, а на глубине 3500 м и более – минус 5-10^{0}С. Поэтому заливочная жидкость не должна замерзать в указанном диапазоне температур. Такие жидкости формируются на основе экологически чистых гликолевых смесей. Их плотность составляет $0{,}95 \div 0{,}96$ *г/см*^{3}, или $(9{,}5 \div 9{,}6) \cdot 10^{-3}$ *МН/м*^{3}.

Успешная проводка скважины в таких условиях зависит от определения необходимой высоты H_0 ее заполнения заливочной жидкостью, чтобы избежать появления как упругой деформации, так и деформации ползучести льда, способствующих заплыванию контура ствола скважины и прекращению спуска бурового снаряда по ранее пробуренной ее части.

С учетом равновесия между боковым напряжением и давлением столба заливочной жидкости, а также максимальной деформации в поперечном направлении $\varepsilon_{max} = \varepsilon_у + \varepsilon_п \leq [\varepsilon]$, где $\varepsilon_у$,$\varepsilon_п$,$[\varepsilon]$ -относительная деформация соответственно упругая, ползучести и допускаемая, получено выражение для требуемой высоты столба заливочной жидкости:

$$H_0 = \frac{1}{\gamma_з} \cdot \left[\frac{\mu \cdot \gamma_л \cdot H}{E \cdot (1 - \mu)} + t_з \cdot V_п - [\varepsilon] \right],$$

где $\gamma_з$, $\gamma_л$ - удельный вес соответственно заливочной жидкости и льда; H - мощность ледника; $V_п$ - скорость ползучести льда; $t_з$ - время конвергенции контура ствола скважины до допустимой величины $[\varepsilon]$.

Приведенная методика проверена при бурении глубокой скважины на станции Восток (Антарктида), где при общей глубине скважины более 3620 м высота столба заливочной жидкости составила 2500 м.

Деформирование и разрушение соляных пород при разработке месторождений

С.А. Константинова, С.А. Чернопазов (Пермь)

При разработке месторождений полезных ископаемых могут иметь место негативные события и катастрофы, которые инициируются природными и техногенными факторами. В настоящее время нет альтернативы расчетным методам для определения параметров горных работ. Целью работы является дальнейшее развитие механических моделей поведения породного массива, сложенного соляными породами, при его разработке подземным способом.

В работе выполнен анализ лабораторных исследований поведения соляных пород на различных стадиях деформирования, а также анализ деформационного разупрочнения и повреждаемости. Процесс деформирования рассматривается как многостадийный. На первой и второй стадии деформирования поведение породы описывается нелинейной теорией наследственности с учетом длительной прочности и дилатансии. При построении ядер ползучести учтены и скорректированы обнаруженные особенности ползучести лабораторных образцов, связанные с разуплотнением и начальной поврежденностью. Разупрочнение на третьей стадии является преимущественно деформационным. В качестве модели деформирования разупрочняющейся породы предложен вариант теории пластичности. Дана постановка и обоснование краевой задачи вязкоупругопластичности о возмущении напряженно - деформированного состояния начально напряженного реологически равновесного породного массива, сформулирован вариационный принцип и разработан алгоритм численного решения вариационной задачи.

Предполагается, что история деформирования породного массива, предшествующая возмущению напряженного состояния, не оказывает влияние на реологические процессы деформирования. Задача ставится в приращениях деформаций, отсчитываемых с момента возмущения, и в полных компонентах тензора напряжений. Такой подход позволяет адекватно моделировать энергию формоизменения, определяющую интенсивность реологических процессов, поле перемещений и взаимодействие на контактах.

Выполнено сопоставление расчетных результатов с известными решениями других авторов и натурными данными для горно - геологических условий рудника «Интернациональный», исследованы закономерности деформирования и разупрочнения пород в вертикальных и горизонтальных одиночных выработках в строящемся руднике «Мир» на кимберлитовых месторождениях России - Якутии. Выполнен анализ влияния параметров горных работ при эксплуатации пластового калийного месторождения в геодинамически опасной зоне на Верхнекамском месторождении калийных и калийно - магниевых солей.

Метод многомасштабной декомпозиции для вычисления эффективных свойств композитов

С.П. Копысов, Ю.А. Сагдеева (Ижевск)

В механике композитов одной из важных задач является задача определения эффективных характеристик для некоторой однородной среды, решение краевой задачи для которой с теми же граничными условиями, что и для задачи композиционной среды, мало отличается от решения соответствующей задачи для композита.

Рассматривается задача определения упругих эффективных характеристик трехмерного композита методом многомасштабной декомпозиции. Метод основан на представлении функции с помощью вейвлет - преобразования.

Численные эксперименты представлены для композита с шарообразными включениями. В качестве базиса для вейвлет - представления выбран ортогональный базис Хаара. Получаемая с помощью МКЭ система уравнений после применения дискретного преобразования Хаара преобразуется к блочной системе. Уравнения системы делятся на два типа – уравнения с неизвестным вектором осредненных величин и уравнения с неизвестным вектором уточняющих коэффициентов. С помощью дополнения Шура определяется система для осредненных величин. После этого система или разрешается – в результате получаем вектор осредненных величин и эффективные характеристики, или к системе снова рекурсивно применяется вышеописанный алгоритм. При применении многомасштабной декомпозиции можно получить осреднение различной степени точности, выбирая нужный уровень вложенности рекурсии.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-07-90265).

Экспериментально-теоретические исследования особенностей деформационного поведения упругих тел в рамках несимметричной теории упругости

В.В. Корепанов, В.П. Матвеенко, И.Н. Шардаков (Пермь)

Начиная с первых работ братьев Коссера по несимметричной теории упругости и до настоящего времени, практически отсутствуют надежные экспериментальные результаты, подтверждающие факт «моментного» поведения упругих материалов.

Данная работа посвящена теоретико - экспериментальному исследованию особенностей деформационного поведения упругих тел в рамках несимметричной теории упругости.

В качестве экспериментально реализуемой схемы по деформированию материала была выбрана задача Кирша о растяжении бесконечной пластины, ослабленной круговым отверстием, аналитическое решение которой в рамках несимметричной теории упругости приведено в работе [1]. Анализ аналитического решения [1] позволил определить макропараметры, которые откликаются на «моментные» свойства материала, и которые конструктивно экспериментально измеряемы. В качестве таких параметров были выбраны: величины, характеризующие степень искажения контура кругового отверстия и искажение толщины пластины по контуру отверстия.

Для реализации эксперимента было спроектировано и изготовлено нагружающее устройство. Для регистрации макропараметров были использованы: электронный микроскоп - интерферометр «NewView-5000»; оптический микроскоп с цифровой фоторегистрацией.

Работа финансировалась из средств гранта PE-009-0 Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР).

1. Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н. Построение и анализ точного аналитического решения задачи Кирша в рамках континуума и псевдоконтинуума Коссера // ПМТФ - Новосибирск, 2001, №4. С.145-154.

Экспериментальное исследование влияния седиментации на развитие конвекции реагирующего мономера в центробежном поле

К.Г. Костарев, А.В. Шмыров (Пермь)

Хотя синтетические полимерные материалы известны уже второе столетие, исследование факторов, влияющих на формирование их свойств и самой структуры, далеко от завершения. Причиной этого является невозможность ответить на все возникающие вопросы с помощью только химических методов. Одним из перспективных направлений решения ряда задач физхимии полимеров может оказаться использование подходов, традиционных для экспериментальной гидродинамики.

Реакция полимеризации весьма чувствительна к уровню гравитации. В настоящий момент установлено, что существует, по крайней мере, четыре гравитационно - чувствительных механизма, участвующих в процессе полимерного синтеза. Два из них - седиментация первичных полимерных микрочастиц и конвекция реагирующего мономера - представляют интерес точки зрения гидродинамики, поскольку действуют на жидкой стадии реакции. Наиболее сильной при нормальной силе тяжести оказывается конвекция, вызванная экзотермичностью реакции и изменением плотности мономера в ходе его превращения (конверсии) в полимер. Седиментация значительно слабее конвекции по степени влияния на процесс полимеризации и маскируется ею.

Однако с увеличением уровня гравитации интенсивность осаждения микрочастиц может существенно возрасти. Для выяснения роли седиментации и характера ее взаимодействия с конвекцией в условиях повышенной гравитации была проведена серия экспериментов по исследованию термически инициируемой полимеризации полиакриламидных гелей в центробежном поле. С этой целью кювета в виде тонкого диска, заполненного реагирующим полимером, устанавливалась на центрифугу и приводилась во вращение с различными скоростями.

В результате проведенных экспериментов были визуализированы течения, поля температуры и конверсии мономера, подтверждена гипотеза о возможности перестройки реакции с объемного типа развития на фронтальный под действием седиментации, выявлен стабилизирующий характер седиментации по отношению к потере механического равновесия реагирующим мономером, определен уровень перегрузок, при котором начинается стабилизация равновесия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-03-96487) и Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009-0).

О спонтанной закрутке в модельных МГД-течениях с замкнутыми линиями тока

М.С. Котельникова (Новосибирск)

Задача о спонтанной закрутке формулируется следующим образом: пусть имеется стационарное полоидальное течение вязкой жидкости в ограниченной области, поддерживаемое полем массовых сил. В этот поток вносятся малые возмущения с отличной от нуля азимутальной составляющей скорости. Если в результате эволюции начальных возмущений вырабатывается течение, в котором азимутальная составляющая скорости конечна, то говорят о возникновении спонтанной закрутки.

В [1,2] показано, что бифуркация осесимметричного течения – появление вращательно - симметричного течения – не имеет места для произвольной сжимаемой жидкости с переменным коэффициентом вязкости. Для осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости с конечной проводимостью в магнитном поле в [3] показано, что вращательно - симметричная спонтанная закрутка невозможна, если сечение области течения меридиональной плоскостью является односвязным. В таких областях полоидальные компоненты магнитного поля исчезают со временем из-за конечной проводимости. Для идеально проводящей жидкости характер связности области течения не имеет значения, так как в осесимметричных течениях такой жидкости полоидальные компоненты магнитного поля из-за вмороженности не исчезают, и, как показано в [4], при определенных условиях имеет место неустойчивость к закрутке (экспоненциальный или (при некоторых условиях) линейный рост азимутальных возмущений со временем).

В данной работе предложен метод численного решения задачи о возникновении спонтанной закрутки в стационарных модельных течениях вязкой идеально проводящей жидкости в магнитном поле с замкнутыми линиями тока. Определены области устойчивости, колебаний и неустойчивости в зависимости от параметров вязкости и коэффициента пропорциональности между полоидальными компонентами поля скорости и магнитного поля.

1. Луговцов Б.А. Возможна ли спонтанная закрутка осесимметричного течения? // ПМТФ. 1994. Т. 35. N. 2. С. 50 – 54.

2. Губарев Ю.Г., Луговцов Б.А. О спонтанной закрутке в осесимметричных течениях // ПМТФ. 1995. Т. 36. N. 4. С. 52 – 59.

3. Губарев Ю.Г., Луговцов Б.А. О спонтанной закрутке в осесимметричных течениях проводящей жидкости в магнитном поле // ПМТФ. 1996. Т. 37. N. 6. С. 35 – 43.

4. Луговцов Б.А. Осесимметричная спонтанная закрутка в идеально проводящей жидкости в магнитном поле // ПМТФ. 1997. Т. 38. N. 6. С. 29 – 31.

Моделирование процесса экструзии профилированных изделий из резины

В.Д. Кошур, С.А. Мартьянов (Красноярск)

При изготовлении профилированных изделий из резины методом экструзии - продавливанием материала через отверстие определенной формы - происходят существенные искажения сечения полученного профилированного изделия. Определение формы отверстия фильеры, которая обеспечивала после продавливания и остывания материала (резины) получение изделия требуемой формы, является актуальной задачей. Для экструзии изделий из металлов эта проблема практически решена, так как при обработке металлов остаточные технологические напряжения не велики и искажения, как правило, незначительны.

При экструзии различных материалов и смесей искажения формы полученного профиля связаны с неравномерным распределением скоростей движения вещества через отверстие. В центре сечения скорость выше, чем у границ и в угловых зонах изделия, где движение выдавливаемого материала существенно замедляется трением о неподвижные поверхности фильеры. Разность скоростей движения в различных зонах приводит к сдвигу материала и скольжению, интенсивность которого определяется градиентом скорости. Для кругового сечения, ввиду симметрии, имеет место только равномерное расширение по радиусу, поэтому круговой профиль не искажается. Тогда как уже для отверстия прямоугольной формы имеет место неравномерное расширение материала, и в результате выдавливания резины получается профиль овальной формы. Поэтому чтобы получить прямоугольный профиль требуемого размера, необходимо найти форму отверстия с вогнутыми сторонами и меньшего размера. Практически эта задача решается путём опытного подбора вогнутости боковых граней отверстия и снижением трения на стенках формообразующей детали за счет введения модификаторов в резиновую смесь и воздействием на неё инфразвуковой (5-20 Гц) или ультразвуковой (10^4 Гц) частотой.

Для моделирования этой задачи в качестве основной причины искажений готового профиля рассматривается трение резины о стенки формующего отверстия, и решение задачи экструзии разбивается на два этапа: расчет поля скоростей течения резины в окне фильеры и расчет сечения профиля по заданному распределению скоростей. При моделировании используются гипотезы течения вязкой несжимаемой жидкости и гипотеза плоских сечений деформируемого тела. В качестве общего метода для построения численной модели использован дискретно - вариационный метод.

О методах идентификации характеристик неоднородных материалов

А.С. Кравчук (Москва)

Рассматривается задача об определении механических свойств и геометрических параметров неоднородных материалов, в том числе композитов, неразрушающими методами. Задача рассматривается как этап общей проблемы построения математической модели поведения неоднородного материала или конструкции, называемый идентификацией.

Неразрушающие методы испытаний дают экспериментально наблюдаемые значения некоторых параметров или функций на границе объекта (образца, конструкции). Задача идентификации в данном случае решается путем минимизации некоторой оценки рассогласования между результатами, наблюдаемыми в эксперименте, и предсказаниями теории; эту оценку называют функцией цели. Аргументами функции (функционала) цели являются идентифицируемые параметры. В работе рассматриваются два принципиально различных метода сбора экспериментальной информации и, соответственно, два метода идентификации. Первый метод основан на использовании квазистатического нагружения тела системой жестких инденторов. Условие отсутствия необратимых изменений в материале приводит к необходимости применения инденторов с гладкой границей. Математической моделью взаимодействия гладких инденторов с деформируемым телом является контактная задача с переменной областью контакта, представляющая собой систему с односторонними связями. В работе выписана полная система соотношений локальной модели, проведено преобразование к вариационной постановке. Предложена система независимых экспериментов, достаточных для идентификации параметров кусочно - однородных материалов (композитов). Изучены вопросы существования и единственности решения. Второй из исследуемых методов идентификации является динамическим (волновым) и имеет приложения в разведочной геофизике и биомедицинской диагностике. Сканирование объекта производится при помощи фокусированных акустических волн. Предполагается, что неоднородность среды мала, длины волн намного меньше характерного размера неоднородностей, так что применимо приближение геометрической оптики.

Новый результат заключается в указании системы независимых экспериментов, позволяющих построить решение задачи идентификации. Новым является также выражение для оценки рассогласования экспериментальных данных и предсказаний теории. Выведены условия экстремума, позволяющие изучить вопрос о существовании и единственности решения, а также указать эффективные алгоритмы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-01-00789), а также НТП «Университеты России. Фундаментальные исследования», проект № УР.04.026.

Движение слоев намагничивающихся жидкостей в неоднородных магнитных полях

С.Д. Краснов, В.А. Налетова, В.А. Турков (Москва)

Исследуется возможность создания расходного течения магнитной жидкости при помощи магнитного поля. В [1] было рассмотрено движение слоя вязкой жидкости из-за волнообразного движения ограничивающих непроницаемых стенок. В [2] рассматривалось двухслойное течение. Волнообразное возмущение границы раздела между двумя слоями вязких жидкостей задавалось. В вышеуказанных работах сила, создающая такое движение, не рассматривалась. Возмущение границы раздела двух сред может быть вызвано магнитными силами, если хотя бы одна из сред намагничивается. В [3] экспериментально и теоретически (в рамках модели идеальной жидкости) исследовано движение слоя магнитной жидкости в бегущем магнитном поле. В [4,5] движение слоя несжимаемой магнитной жидкости на твердой подложке, вызываемое неоднородным магнитным полем, исследовано в рамках модели вязкой жидкости. В длинноволновом приближении проведено упрощение системы уравнений и получено уравнение для толщины пленки.

В настоящей работе исследовано поведение двухслойного течения двух вязких несмешивающихся жидкостей, одна из которых - магнитная жидкость в переменном по пространству и по времени магнитом поле. Рассматривалось течение в плоском канале с твердыми стенками. Учитывалось влияние движения ненамагничивающейся жидкости на движение магнитной жидкости. Проведено упрощение уравнений в длинноволновом приближении и показано, что, в отличие от случая, рассмотренного в [5], для определения толщины слоя магнитной жидкости необходимо решать два дифференциальных уравнения. Решена задача об определении периодического магнитного поля, создающего синусоидальную бегущую волну малой амплитуды на поверхности раздела двух сред. Вычислен расход в таком течении.

1. J.C. Burns, T. Parkes, Peristaltic motion // J. Fluid Mech. 29 part 4 (1967) 731-743.

2. I. Zeidis, K. Zimmermann, Ein mathematisches Modell fur die peristaltische Bewegung als Grundlage fur das Design wurmartiger Mikroroboter // Technische Mechanik 20 (1) (2000) 73-80.

3. H. Kikura, T. Sawada, T. Tanahashi, L.S. Seo, Propagation of surface waves of magnetic fluid in traveling magnetic fields // J. Magn. Magn. Mater. 85 (1990) 167-170.

4. A.N. Tyatyushkin, Thin magnetic liquid layer in magnetic field. 9-th Int. Conf. on Magnetic Fluid, Bremen, 23-27 July, Book of Abstracts, (2001) 169.

5. K. Zimmermann, I. Zeidis, V. Naletova, V. Turkov, Ein mathematisches Modell fur eine wurmartige Lokomotion basierend auf der Bewegung einer magnetischen Flussigkeit in einem Magnetfeld. 47 Int. Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universitaet Ilmenau, 2002, 268-269.

Эксперименты по кристаллической конверсии графита в алмаз на крупномасштабной баллистической установке ЦНИИМАШ

П.В. Крюков, А.И. Чирков (Москва)

В вакуумированном баллистическом канале установки длиной 200 м под действием расширяющихся продуктов взрыва газовой смеси производится метание стальных гиростабилизированных дисков диаметром 0.5 м, двигающихся в канале на магнитном подвесе без касания со стенками. В январе и апреле 1997 г. было осуществлено, соответственно, два эксперимента по демонстрации возможности реализации кристаллической конверсии графита в алмаз в условиях динамического нагружения со сдвигом. В этих экспериментах были получены выходные скорости метания 1.4 км/с и 1.6 км/с для дисков весом 30 кг. Высокоскоростной удар диском по мишени с образцами графита демпфировался газообразным водородом, заполняющим разгонный участок трубы, что обеспечивало профилированную во времени нагрузку кристаллов графита до 26 ГПа в течение 12 мкс без ударноволнового разогрева и механического разрушения при разгрузке. Скорость сдвигового деформирования достигала 350 м/с. При ориентированном сдвиговом деформировании сжатого монокристалла графита строго вдоль атомных плоскостей возможна реализация когерентной перестройки кристаллической решетки графита. При этом быстрое относительное скольжение атомных слоев стимулирует практически одновременный переход атомов углерода в новое электронное состояние с образованием прочных межслойных ковалентных связей, что обеспечивает перестройку кристаллической структуры графита.

Материаловедческие исследования графитовых образцов до и после нагружения показали, что из-за высокой угловой разориентации (~1°) монокристаллических доменов в исходных графитовых образцах прямой переход в алмаз в макроскопическом объеме совершался некогерентным образом в диффузионном режиме, а не в волновом, как предполагалось априори, что обусловило ограниченную (не более 0.3 мм) глубину проникновения алмазной фазы в образцы с поперечным размером 20×20 мм. Когерентная перестройка кристаллической решетки графита в алмаз наблюдалась только в пределах отдельных монокристаллических доменов размером ~ 10 мкм. На основании проведенных исследований сделан вывод, что для осуществления когерентной перестройки кристаллической решетки графита в алмаз в волновом режиме во всем объеме графитового образца толщиной до 5 мм с сохранением исходного кристаллического качества динамическому нагружению со сдвигом необходимо подвергать кристаллы графита, имеющие практически идеальную структуру.

Исследование стохастических колебаний гибких многослойных неспаянных ортотропных пластинок при действии продольных знакопеременных нагрузок

А.В. Крысько, О.А. Овсянникова (Саратов)

Для указанной в заголовке работы построена математическая модель теории гибких неспаянных многослойных пластинок. В качестве основополагающих гипотез приняты гипотезы Кирхгофа или типа Тимошенко для каждой пластинки - слоя. Между слоями пластинок имеется зазор, который позволяет ей проскальзывать, кроме этого каждый слой может состоять из ряда подслоев, которые имеют идеальный контакт, и для них целиком справедлива одна из указанных выше кинематических гипотез (Кирхгофа или типа Тимошенко). Геометрическая нелинейность учитывается по модели Кармана. Возможны сочетания слоев как гибких, так и жестких. Предлагается учитывать зону контакта между слоями на основе гипотезы Винклера. Строится на каждом шаге по времени итерационная по уточнению зона контакта. Построен алгоритм расчета, который существенно уменьшает число уравнений. Бесконечномерная задача сводится к конечномерной с помощью метода конечных разностей с последующим решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений по методам Рунге - Кутта. Дается новая классификация динамических задач теории многослойных неспаянных пластинок: диссипативные системы, консервативные и диссипативно - консервативные.

С помощью качественной теории дифференциальных уравнений и нелинейной динамики исследуется сложное поведение многослойных неспаянных пластин при действии параметрической знакопеременной нагрузки в зависимости от амплитуды вынуждающей нагрузки, ее частоты, типа материала конструкции, кинематической модели слоев, расстояние между пластинками, граничных уравнений.

Исследования бифуркаций бесконечно длиных пластин и оболочек при действии поперечных и продольных знакопеременных нагрузок

А.В. Крысько, В.О. Назарьянц, Г.Г. Наркайтис (Саратов)

В работе исследуются сложные колебания бесконечно длинных цилиндрических панелей и пластин при действии поперечных и продольных знакопеременных нагрузок. Механическая система рассматривается как система с бесконечным числом степеней свободы. Бесконечномерная задача сводится к конечномерной с помощью метода конечных разностей по пространству с аппроксимацией $O(h^4)$. Обыкновенные дифференциальные уравнения решаются методом Рунге-Кутта. Исследуются сценарии перехода гармонических колебаний указанных механических систем в хаотические. Для этого исследования проводятся с помощью качественной теории дифференциальных уравнений и нелинейной динамики. Для оценки поведения указанных систем построены: алгоритмы получения зависимостей прогиба, перемещений от времени для прозвольной точки механической системы; фазовые портреты; показатели Ляпунова; сечения Пуанкаре; зависимость максимального прогиба от управляющего параметра.

Предлагается для распределенных систем строить не бифуркационные диаграммы, которые обычно строятся для сценария Фейгенбаума, а шкалу бифуркаций, зависящую от управляющего параметра – амплитуды поперечной, продольной нагрузок. Построены “карты” характера колебаний механических систем в зависимости от управляющего параметра. Это связано с тем, что возможны различные варианты перехода к хаосу. В работе для бесконечномерных систем обнаружены новые явления, когда после одной бифуркации удвоения периода скачком наступает бифуркации утроения, упятирения, усемерения, удевятирения, уодинацетирения периода. Следует отметить, что для дискретных систем данное явление описывается теоремой А.Н. Шарковского.

Вычисление спектра Ляпуновских показателей строится по методу Бенети. Дается анализ спектра Ляпуновских показателей в зависимости от амплитуды управляющего параметра. Следует заметить, что исследование зависимости W_{max} от амплитуды управляющего параметра совместно со шкалой бифуркаций является конкурентноспособной методикой изучения устойчивости колебаний по сравнению рассмотрением максимального Ляпуновского показателя. Качественно результаты полностью совпадают.

В случае Фейгенбауманского сценария перехода к хаосу численно получены константы Фейгенбаума, которые отличаются от теоретического значения менее чем на 0.8%. Выявлена серия новых аттракторов.

Исследование стохастических колебаний гибких сферических и конических оболочек

В.А. Крысько, И.В. Кравцова, Т.В. Щекатурова (Саратов)

В работе построены математические модели стохастических колебаний гибких детерминистских систем в виде пологих сферических и конических оболочек при действии поперечной знакопеременной нагрузки, исследуются сценарии перехода колебаний систем в хаос в зависимости от ряда управляющих параметров.

1. *Гибкие конические пологие оболочки*. Рассматривается распределенная система как система с бесконечным числом степеней свободы. Решение разлагается в ряд Фурье по пространственным координатам с неизвестными коэффициентами, зависящими от времени. Построена система координат функции для произвольных краевых условий. Далее строится процедура Ритца, которая сводит бесконечно мерную искомую задачу к конечномерной системе обыкновенных дифференциальных уравнений и системе алгебраических уравнений, которую удается для высших приближений разрешить аналитически, что в конечном итоге сводит поставленную проблему к решению обширной системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Исследуется сходимость решения по пространственным координатам для хаотических колебаний в зависимости от стрелы подъема конических оболочек, краевых условий, амплитуды и частоты вынуждающей поперечной силы. Построены карты зависимости частоты вынуждающей силы, амплитуды и стрелы подъема. Получены константы Фейхенбаума и выявлены новые сценарии перехода колебаний системы из гармонических в хаотические.

2. *Гибкие пологие сферические осесимметричные оболочки*. В отличие от первой модели здесь построен принципиально другой алгоритм, основанный на замене бесконечномерных пространственных переменных конечно-мерными на основе метода конечных разностей $O(h^2)$. Исследуется сходимость метода в зависимости от количества точек разбиения пространственных координат, краевых условий, стрелы подъема. Построены карты колебаний в зависимости от управляющих параметров. Получены константы Фейхенбаума в случае перехода в хаос по сценарию Фейхенбауму. Выявлены новые сценарии перехода колебаний сферических оболочек из гармонических в хаотические.

Оба алгоритма позволяют исследовать стохастическую детерминистскую систему для указанных конструкций с помощью качественной теории дифференциальных уравнений. Исследуются сигналы, фазовые портреты, спектры мощности, максимальный прогиб амплитуды вынуждающей нагрузки при фиксированной частоте возбуждения. Были обнаружены для указанных конструкций принципиально новые сценарии перехода колебаний из состояния гармонических в хаотические.

Магнито-гранулометрический анализ концентрированных феррожидкостей

О.Б. Кузнецова (Екатеринбург)

Наиболее эффективным методом определения дисперсного состава коллоидных частиц феррожидкости является магнито - гранулометрический анализ, который позволяет получить информацию о размерах частиц при обработке экспериментальных кривых намагничивания. В качестве объекта исследования использовались данные о концентрированной магнитной жидкости типа "магнетит в жидких углеводородах", приведенные в статье [1]. Путем ее разбавления были получены семь образцов, результаты анализа которых представлены в таблице (φ есть степень разбавления). Казалось бы, магнито-гранулометрический анализ для всех случаев должен дать одинаковый фракционный состав. Однако результаты [1], приведенные в пяти первых строках таблицы, показывают, что изученные модели дают близкие значения только для предельно разбавленного образца (φ = 0.088). Из этого следует, что указанные теории недостаточно корректно учитывают межчастичные диполь - дипольные взаимодействия в концентрированных феррожидкостях. В последней строке таблицы представлены данные анализа, полученные на основе модели [2].

Таблица. Средний диаметр магнитного ядра феррочастиц (нм)

φ Модель	0.088	0.137	0.197	0.296	0.444	0.664	1
Ланжевен	7.1	7.2	7.0	6.4	6.3	6.3	6.0
Вейсс	7.3	7.6	7.7	7.6	8.0	8.5	8.9
ССМ	7.3	7.5	7.5	7.1	7.2	7.2	6.9
ТТВ	7.3	7.4	7.4	6.9	6.7	6.5	5.6
МТЭФ	7.3	7.5	7.5	7.1	7.1	7.1	6.8
	7.299	7.319	7.316	7.311	7.299	7.299	7.293

Результаты магнито - гранулометрического анализа магнитных жидкостей решающим образом зависят от выбранной теоретической модели. Среди рассмотренных наилучшие результаты дает теория [2]. Причем ее данные о фракционном составе оказываются устойчивыми к степени разбавления, что свидетельствует о корректности модели.

Работа выполнена при поддержке гранта № 02-15-99308м Президента РФ, гранта № 03-02-16115а РФФИ и в рамках программы REC-005 (CRDF).

1. Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V. J. Magn. Magn. Mat. 161 (1996) 94.

2. Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Physical Review E. 64 (2001) 041405.

Модификация пакета программ SINARA для расчета слабосжимаемых сред

С.Ю. Кузьмин, С.Н. Лебедев, М.С. Ураков (Снежинск)

Пакет программ SINARA [1] предназначен для математического моделирования широкого круга прикладных задач механики сплошной среды.

Авторами была проведена работа по повышению эффективности вычислений для моделирования течений почти несжимаемой жидкости. Для расчета таких течений в пакете программ SINARA был введен ряд модификаций в уравнения и схему, а именно: в уравнение сохранения импульса введен итерационный параметр для искусственного повышения чисел Маха за пределы дозвукового течения; для борьбы с высокочастотными осцилляциями в поле скоростей проводится сглаживание скоростей четвертыми разностями; в уравнения введен учет физической вязкости.

Приведенные выше изменения в пакете программ SINARA были апробированы на ряде тестовых задач.

1. Гаджиев А.Д., Гаджиева В.В., Кузьмин С.Ю., Лебедев С.Н. и др. Пакет программ SINARA математического моделирования динамики аварийных процессов в ядерных энергетических установках атомных электростанций на быстрых нейтронах. ВАНТ, Сер: Математическое моделирование физических процессов, 2000, в.3, с. 25-35.

Тестирование производительности коммуникационной среды МВС-1000

Ю.И. Кузякин (Екатеринбург), Г.Ф. Масич, С.С. Перетятько (Пермь)

В МВС-1000 существует две симметричных сети FastEthernet. Одна используется для управления кластером, вторая исключительно для межпроцессорного взаимодействия. Обе объедены с помощью идентичных коммутаторов, но используют различные сетевые интерфейсы. Авторы произвели тест зависимости производительности от следующих параметров: а) различные сетевые адаптеры; б) задержки, вносимые коммутатором; в) задержки, вносимые стеком протоколов TCP/IP. Определялись и сравнивались следующие характеристики: время реакции, пропускная способность, задержка передачи. Тестирование осуществлялось с использованием пакета netperf (*www.netperf.org*) [1], для уровней TCP и UDP, и разработанный пакет ethTest для тестирования на уровне FastEthernet.

Выполненные тесты:

а) тест на уровне TCP. Замерялась величина задержки между временем отправки данных и временем приема ответа. Тест выявил вывод о неодинаковой производительности сетевых адаптеров FastEthernet. При этом разница в производительности снижается с увеличением размера передаваемых данных;

б) тест на уровне UDP. Показано, что при использование протокола UDP по сравнению с использованием протокола TCP, латентность снижается на 9.3мкс;

в) тест на уровне FastEthernet. В одном случае передача информации осуществлялась через коммутатор, в другом случае сетевые адаптеры соединялись напрямую. Разница в латентности составила 16мкс.

В выполненной работе показано различие в производительности коммуникационной сети FastEthernet в зависимости от используемого аппаратного обеспечения, отражены пути увеличения производительности сети. Показана потенциальная величина латентности при отказе от стека протоколов TCP/IP.

1. Кузьминский М., Мускатин А. Тесты производительности // Открытые системы, 2001, №7-8

Сверхпластическая деформация разносопротивляющихся материалов

В.И. Кунеев (Бишкек)

При изучении явления сверхпластичности обнаруживается обусловленность результата формоизменения взаимодействием металлических фаз, их стабилизацией с процессом деформации. Практический интерес представляет исследование эффекта сверхпластичности материалов, неодинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию. Типичными представителями таких материалов являются серые чугуны (полухрупкие материалы), например, СЧ-12-28, СЧ-15-32. Особенность деформирования таких материалов связана с так называемым их разрыхлением. Известны эксперименты, в которых обнаружена сверхпластичность чугуна, полученного путем напыления с целью достижения мелкозернистой структуры (структурная сверхпластичность).

В работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования “динамической” сверхпластичности чугуна СЧ-12-28 при растяжении и сжатии. Предварительной обработке, связанной с изменением зерна, материал не подвергался. Аномальные деформации наблюдались в интервалах температур, непосредственно прилегающих к границам $\alpha \Leftrightarrow \gamma$ перехода. Деформация металлических фаз протекала без каких-либо признаков упрочнения и была равномерна до самых высоких степеней деформаций. Всплеск пластичности (удлинение $\delta = 30\%$ и осадка $\delta = 70\%$) происходил при малых значениях напряжений $\sigma_p = 8\ МПа$, $\sigma_c = 35\ МПа$ и границах скоростей деформирования $\dot{\varepsilon} = 10^{-5}...10^{-3}\ c^{-1}$.

Следуя концепции скольжения, разработана математическая модель связи напряжений с деформациями и их скоростями, пригодная для описания закономерностей деформирования разносопротивляющихся материалов в широком температурно-скоростном режиме, включая интервалы сверхпластичности.

Сопротивление сдвигу S_{NL} для таких материалов зависит не только от интенсивности касательных напряжений в произвольной плоскости N и направлений L, но и от нормальных напряжений.

В качестве практического применения эффекта сверхпластичности проведена пробная изотермическая штамповка тонкостенных чугунных стаканов из толстостенных колец. В условиях сложного напряженного состояния, соответствующего реальному процессу обработки металлов давлением, в аналитические зависимости (характеристическую функцию) введена гидростатическая составляющая.

Численное моделирование трехмерных релятивистских газодинамических течений

Е.П. Курбатов (Челябинск)

Развит численный код для моделирования трехмерных газодинамических релятивистских течений в плоском пространстве - времени в лоренцевых координатах. В основе численного кода лежит разностная схема годуновского типа повышенного порядка точности. Разностные потоки в схеме вычисляются с помощью процедуры решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва. При этом предполагается, что образующиеся в результате распада разрыва бегущие волны представляют собой только сильные разрывы (ударные волны и контактный разрыв) [1]. При построении решения задачи Римана использовалось уравнение состояния релятивистского идеального газа, полученное с помощью дробно - рациональной аппроксимации точного уравнения состояния газа с релятивистской максвелловской функцией распределения по скоростям [2]. Такое аппроксимированное уравнение состояния правильно описывает зависимости давления и внутренней энергии газа от плотности и температуры для широкого диапазона температур и асимптотически переходит в нерелятивистское и ультрарелятивистское уравнения при соответствующих условиях. Предполагется, что газ имеет все три компоненты скорости по отношении к поверхности первоначального разрыва (нормальную и тангенциальную), что позволяет корректно использовать в схеме процедуру решения задачи Римана для моделирования трехмерных течений релятивистского газа [3]. Для проверки правильности работы численного кода проведены тестовые расчеты задачи Римана о распаде произвольного разрыва и задачи об антизатопленной струе.

1. L.Rezolla, O.Zanotti, J.A.Pons, An Improved Exact Riemann Solver for Multidimensional Relativistic Flows / arXiv:gr-qc/0205034

2. I.V.Sokolov, H.-M.Zhang, J.I.Sakai, Simple and Efficient Exact Riemann Solver for Computational Relativistic Gas Dynamics / J. Comp. Phys 172 (2001) 209-234

3. J.M.Marti, E.Muller / Living Rev.Rel. 2 (1999) 3

Новый взгляд на процесс высокоскоростного упругопластического деформирования реальных тел

В.Т. Курохтин (Москва)

Физическая суть пластического деформирования есть лавинообразный рост дефектов кристаллической решетки. А недавние исследования группы российских ученых под руководством В.Е. Панина обнаружили феномен возникновения вихрей при зарождении пластической деформации. Поэтому автором выдвигается гипотеза о возникновении в теле вихревых движений отдельных блоков, образующихся в процессе импульсного деформирования. Отмечается большое сходство данного процесса с иерархией характерных размеров при развитии турбулентности, описанной А.Н. Колмогоровым. Но при импульсном упругопластическом деформировании сначала происходит процесс разупорядочивания кристаллической решетки, который сопровождается ростом энтропии. Такой подход приводит к отказу от детерминизма, весьма распространенного в механике сплошной среды и, особенно, в механике деформируемого твердого тела. В качестве конкретного примера рассматривается задача о распространении упругопластических волн сдвига в цилиндрическом стержне с учетом процессов диссипации и роста энтропии. В этом случае поверхности скольжения отдельных блоков имеют вид колец с внешним радиусом, совпадающим с радиусом стержня и внутренним радиусом упругого ядра. Процесс пластического деформирования в данной задаче будет развиваться в результате скольжения одного кольца по другому. Энергия, расходуемая в процессе динамического деформирования, идет на повышение температуры стержня и рост энтропии.

Параметрическая оптимизация композитных оболочек

А.Ш. Кусяков (Пермь)

Решение задач параметрической оптимизации композитных оболочек требует проведения многократных расчетов напряженно - деформированного состояния конструкции при различных значениях варьируемых параметров. Сокращение количества повторных решений прямых задач – это одна из основных проблем, которая возникает при построении алгоритмов оптимизации.

Одним из возможных способов, позволяющих решить проблему сокращения числа повторных решений прямых задач, является соответствующая адаптация известных методов нелинейного математического программирования к задачам оптимизации композитных оболочек. Качество проектного решения при этом подходе существенным образом зависит от выбранного метода математического программирования. Исследования, проведенные в этом направлении, показали, что при решении задач оптимизации сложных оболочечных конструкций, на каждом шаге которых требуется большой объем вычислений, этот способ далеко не всегда приводит к желаемым результатам. В настоящей работе используется другой поход к решению задач оптимизации, не требующий применения методов нелинейного математического программирования. Его можно рассматривать как развитие методов оптимального проектирования конструкций на основе инженерных критериев оптимальности (равноустойчивости, равнопрочности и т.д.). В основе предлагаемого алгоритма лежит идея разбиения области нагрузок на ряд характерных подобластей, в каждой из которых активна только определенная группа ограничений. Другими словами, алгоритм выбора оптимальных параметров определяется характером нагружения и напряженно - деформированного состояния конструкции.

Приведены алгоритмы оптимизации и результаты расчетов для различных типов композитных оболочек (гладких, ребристых и подкрепленных заполнителем), работающих на устойчивость и прочность при действии сжимающих нагрузок.

Численное моделирование и исследование воздействия линейных ускорений на работу кровеносной системы

О.В. Лаврова (Новосибирск)

Стационарные и динамические линейные ускорения служат одним из негативных факторов для лётчиков и космонавтов, т.к. нарушают гемодинамические параметры кровеносной системы. Вместе с тем экспериментальные исследования такой задачи трудоёмки и опасны. Целью работы было исследование влияния на работу кровеносной системы человека линейных ускорений.

В работе содержатся результаты исследования данного вопроса по двум направлениям. Во-первых, собран материал и выполнен анализ экспериментальных данных в области авиационно - космической биологии и медицины о физиологических особенностях воздействия ускорений на человеческий организм. Во-вторых, выполнено численное моделирование и исследование распределения крови в организме человека при воздействии на него линейных ускорений.

В результате анализа литературы выявлены основные механизмы воздействия ускорений на организм человека (а также меры компенсации негативных последствий): появление инерционной составляющей; изменение гидростатического давления; наличие весовой перегрузки на костно - мышечный аппарат. Установлено, что наибольшие физиологические отклонения зафиксированы в работе кровеносной системы.

Исходная математическая модель расчета описывает расходно - напорные характеристики эквивалентной гидравлической системы большого круга кровообращения и представляет собой систему уравнений Бернулли, составленную для пяти характерных групп потребителей: 1 - голова, 2 - руки, 3 - миокард, 4 - мышцы туловища и внутренние органы, 5 - мышцы ног, позволяющую определять минутный объем крови по всем тканям организма.

В процессе численного исследования был выполнен расчёт и анализ данных о влиянии на работу кровеносной системы величины линейного ускорения, действующего на человека. Данные получены на усовершенствованной модели расчета в диапазоне α = -10 ... 0 ... +10 g для трех базовых положений тела: стоя, сидя, лежа, и объединены по четырем основным группам потребителей: голова, руки, туловище и ноги. Результаты расчетов качественно и количественно согласуются с известными физиологическими данными. В частности, установлены количественные перераспределения крови между тканями для характерных пороговых значений в областях с положительной, отрицательной перегрузкой. Отдельно исследованы изменения гемодинамических параметров при использовании различных противоперегрузочных костюмов, а также при изменении вязкостных свойств крови.

Фарадеевская неустойчивость на магнитной жидкости с цепочками

А. Ланге, В. Мехоношин (Дрезден)

Исследуется параметрическая генерация стоячих волн на свободной поверхности феррожидкости. Исследование влияния горизонтального магнитного поля на Фарадеевскую неустойчивость, начатое в [1], распространено на случай магнитной жидкости с цепочками. Цепочечные агрегаты образуются благодаря диполь - дипольным взаимодействиям в феррожидкости, содержащей крупные частицы. Целью работы является исследование влияния образования цепочек на динамические свойства магнитной жидкости. Особый интерес представляет изучение вязкоупругих свойств феррожидкости, обусловленных цепочками. Образование цепочек значительно увеличивает время релаксации намагниченности в системе, поэтому вязкоупругость жидкости может быть обнаружена в Фарадеевском эксперименте.

Для описания движения феррожидкости с цепочками используется тензор напряжений, предложенный в [2]. Цепочки моделируются эллипсоидами вращения с жестко закрепленными магнитными моментами. Тензор напряжений Лесли-Ериксоновского типа был предложен для такой системы в [3].

Линейный анализ устойчивости осуществляется с использованием стандартной Флоке - подстановки. Исследованы два типа модельных феррожидкостей. К первой группе принадлежат пространственно - однородные феррожидкости (без цепочек), намагниченность которых либо равновесна, либо неравновесна. Вторую группу составляют магнитные жидкости с цепочками, время ориентационной релаксации которых либо пренебрежимо мало, либо конечно.

Показано, что появление даже коротких цепочек, состоящих из нескольких частиц, значительно влияет на порог устойчивости. Наиболее ярко выраженным эффектом является уменьшение критического волнового числа. Причинами этого уменьшения являются: возрастание времени релаксации намагниченности и значительный рост магнитной восприимчивости, обусловленные формированием цепочек. Изменения критической амплитуды ускорения определяются балансом двух конкурирующих факторов: увеличения эффективной вязкости, вызванного образованием цепочек, и уменьшения критического волнового числа, которое приводит к ослаблению вязкой диссипации энергии [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Немецкого научного фонда (DFG грант LA 1182/2-3).

1. V. V. Mekhonoshin, A. Lange, Phys. Rev. E 65, 061509 (2002)

2. A. Yu. Zubarev, L. Yu. Iskakova, Phys. Rev. E 61, 5415 (2000)

3. В. Н. Покровский, УФН 105, 626 (1971)

Влияние стоячей звуковой волны на возникновение конвекции в горизонтальном слое

Н.А. Лапина, Д.В. Любимов, Т.П. Любимова, С.В. Шкляев (Пермь)

Рассматривается возникновение конвекции в подогреваемом снизу горизонтальном слое. В жидкости возбуждена стоячая звуковая волна, поле пульсационной скорости в которой горизонтально. Длина звуковой волны велика по сравнению с толщиной слоя. Рассматривались теплоизолированные и слабо-теплопроводные границы слоя.

Как показано в [1], уравнения термоакустической конвекции в данных условиях совпадают с уравнениями Буссинеска, а все влияние звуковой волны сводится к генерации в жидкости так называемого акустического течения.

Определено основное стационарное двумерное пространственно - периодическое течение, на высоте слоя укладываются два вихря. Задача устойчивости этого течения относительно длинноволновых возмущений решалась методом многих масштабов.

В случае слабого акустического воздействия получено амплитудное уравнение с периодическими коэффициентами, описывающее поведение нейтральных возмущений в слое с теплоизолированными границами. Для случая границ слабой теплопроводности это уравнение решается совместно с уравнениями теплопроводности в твердых массивах. Проведено аналитическое и численное исследование этих уравнений, показано, что звуковое воздействие приводит к усилению конвекции. Для теплоизолированных границ в зависимости от параметров задачи наиболее опасными являются плоские или квазиспиральные целые возмущения (продольные валы, модулированные с периодом основного течения). Для слабо-теплопроводных границ обнаружена область параметров, в которой критическими являются модулированные продольные валы, период модуляции которых не соразмерен с периодом основного течения. Увеличение теплопроводности границ подавляет возникновение конвекции.

В случае конечной интенсивности акустического воздействия вблизи узлов пульсационного поля давления возникают пограничные слои. В этом случае для решения задачи применялся метод сращиваемых разложений. Обнаружено, что критическое число Рэлея уменьшается с ростом интенсивности акустического течения. Наиболее опасными являются плоские и квазиспиральные целые возмущения.

Рассмотрено слабо-нелинейное поведение возмущений вблизи порога устойчивости. Определена область существования и устойчивости плоских вторичных течений целого типа.

Работа выполнена при поддержке Программы поддержки ведущих научных школ (грант № 00-15-96112) и CRDF (грант № PE-009-0).

1. Любимов Д.В. Изв. РАН. МЖГ. 2000. №2. С.28-36.

Упругие и прочностные свойства матричных композитов

С.Н. Лапшина, Е.А. Митюшов, Е.М. Романовская (Екатеринбург)

Развитие производства и применение композиционных материалов в различных отраслях промышленности ставит задачу прогнозирования их физико - механических свойств. Чем больше известно характеристик материала, коррелирующих с его прочностью, тем с большей достоверностью можно предсказать его гарантированную прочность, не прибегая к экспериментальному разрушению конструкций и изделий. Пространственно - армированные композиционные материалы отличаются тем, что их механические свойства по различным направлениям различны.

Волокна, введенные в материал, определяют уровень прочностных свойств материала. При этом напряжения, возникающие при нагружении, воспринимаются, в основном, армирующими волокнами. Расширение сферы использования вызывает необходимость получения надежных численных оценок физических и прочностных свойств по данным о свойствах компонент и особенностям их пространственного расположения.

Нами предложен метод расчета, основанный на операции усреднения свойств при разной ориентации осей упругой симметрии материала на участках, каждый из которых представляет собой однонаправленный транстропный материал, и получены конечные выражения для коэффициентов упругости и податливости путем введения параметров армирования, характеризующих расположение волокон в композитном материале, а также рассчитаны предельные напряжения, при которых начинается разрушение пространственно - армированного композита. В результате чего появилась возможность оптимизации свойств композитных материалов и получения материала с необходимым набором упругих и прочностных характеристик.

В качестве модели пространственно - армированного композита рассмотрена трехуровневая модель неоднородной среды, составленная из элементарных объемов, каждый из которых представляет собой однонаправленный композит с различной ориентацией. Суммарная доля элементарных объемов с одинаковой ориентацией волокон пропорциональна их количественному содержанию в реальном композиционном материале, а объемный коэффициент армирования во всех элементарных объемах одинаков. Получены макроскопические модули упругости и податливости, предельное напряжение при одноосном растяжении пространственно - армированного композита по свойствам компонент, их объемному содержанию и характеру пространственного распределения армирующих волокон.

Некоторые способы расчета статической магнитной восприимчивости ферроколлоидов

Е.В. Лахтина (Пермь)

Основным экспериментальным методом исследований влияния межчастичных взаимодействий на свойства магнитных жидкостей является построение температурных и концентрационных кривых статической восприимчивости. Однако измерения восприимчивости этих веществ индукционным методом на частотах вплоть до 0,1 Гц, дают значение не статической, а динамической восприимчивости. Предлагаемая работа посвящена описанию методов, которые позволили удовлетворительно экстраполировать экспериментальные данные, полученные на частотах от 10 до 10^5 Гц, в область инфранизких частот.

В качестве исследуемых жидкостей были отобраны образцы ферроколлоидов, содержащие крупные частицы с высоким уровнем диполь - дипольных взаимодействий и очень высокой (несколько десятков единиц) магнитной проницаемостью. Измерения проводились с помощью моста взаимной индуктивности [1]. По полученным данным строились кривые зависимостей действительной и мнимой частей восприимчивости от температуры образца и частоты зондирующего поля. Экстраполяция осуществлялась двумя типами функций на диаграмме Коул-Коула (χ_{Re}, χ_{Im}): окружностью и полиномами различных степеней. За искомое значение статической восприимчивости принималось значение точки пересечения окружности или полинома, подобранных с помощью метода средних квадратов, с осью действительной части восприимчивости.

Результаты, полученные разными методами (экстраполяцией окружностями, полиномами и непосредственным измерением на инфранизких частотах), совпадают с точностью до 5%. Только при температурах, близких к температуре отвердевания жидкости - носителя (243 К), расхождение достигает 20%. В целом, полученное здесь согласие следует признать хорошим. Существенный разброс результатов в области температур около 240 К может быть связан со слабой неоднородностью температуры образца, когда отдельные его части уже закристаллизовались, а другие еще остались в жидком состоянии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Фонда гражданских исследований и развития для стран СНГ (Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union) (грант № PE-009-0).

1. Пшеничников А. Ф. Дисперсия магнитной восприимчивости магнитных коллоидов// Неравновесные процессы в магнитных суспензиях: Сб. науч. трудов. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1986.

Энергетический критерий хрупкого разрушения для случая комбинированного нагружения

В.В. Лепов, В.Н. Петров, Х.Н. Семенов (Якутск)

Классические критерии прочности, применяющиеся при расчете трещиностойкости конструкций, в большинстве случаев не учитывают возможности одновременного действия статического и импульсного динамического нагружения. Таким образом, становится актуальной разработка методов оценки прочности и ресурса элементов реальных конструкций и машин с концентраторами напряжений на основе моделирования статико - динамического нагружения, представляющего собой комбинацию действующего статического напряжения с кратковременной динамической нагрузкой.

Для достижения данной цели был осуществлен ряд экспериментальных исследований поведения образцов из модельного полимерного материала при импульсном, статическом, и статико - динамическом нагружении на установке “МИУ-1” [1]. Разработанная экспериментальная методика охватывает достаточно широкий диапазон величин статико - динамического нагружения и температур испытания для исследования поведения деформирования образцов из полимерных материалов. Исследования механического поведения образцов с одним боковым надрезом при статико - динамическом нагружении бегущей трещиной дают возможность анализировать и оценить длины страгивания короткой хрупкой трещины, скорость ее распространения, а также определить критические параметры разрушения.

Также были проведены фрактографические исследования поверхности излома разрушенных полимерных образцов и теоретический анализ зависимостей физических характеристик материала от параметров нагружения. Для случая комбинированного статико - динамического нагружения на основе зависимости распределения компонент тензоров деформации и напряжения от скорости распространения трещины разработан новый энергетический критерий разрушения на основе модуля потока энергии [2].

1.Семенов Х.Н., В. П. Ларионов Динамика развития хрупких трещин и высокоскоростное фотографирование. В 2 частях./ Магнитно-импульсная установка для динамических испытаний материалов и высокоскоростное фотографирование быстрых трещин. Часть II. - Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН. -1993. - 188 с.

2. Петров В.Н., Лепов В.В., Семенов Х.Н., Ларионов В.П. Критерий трещиностойкости при комбинированном нагружении, //Заводская лаборатория - 2001, - №10, с.50-55.

Новый механизм деформации и переориентации кристаллической решётки путём динамических фазовых превращений в полях напряжений

И.Ю. Литовченко, А.Д. Коротаев, А.Н. Тюменцев (Томск)

Представлены результаты электронно - микроскопического исследования полос локализации и двойников деформации, формирующихся в аустенитных сталях, сложнолегированном интерметаллиде Ni_3Al и монокристаллах сплава на основе TiNi, в различных условиях механического воздействия (прокатка, кручение в наковальнях Бриджмена и в полях динамических напряжений, генерируемых мощными ионными пучками).

На основе полученных результатов предложен новый механизм деформации и переориентации кристаллической решётки - объёмной деформацией растяжения - сжатия механизмами динамических (прямых и обратных) мартенситных фазовых превращений с осуществлением обратных превращений по альтернативным системам.

С использованием теории мартенситных превращений, основанной на концепции кооперативных тепловых колебаний протяженных двумерных когерентных объектов (плоскостей) в кристаллах, проведен анализ атомных механизмов деформации в процессе $\gamma\rightarrow\alpha\rightarrow\gamma$ (в полосах локализации деформации аустенитных сталей) и B2→B19(B19`)→B2 (в двойниках деформации TiNi сплава) превращений.

Показано, что характерной особенностью и необходимым условием формирования полос динамических фазовых переходов является высокий (приближающийся к теоретической прочности кристалла) уровень локальных внутренних напряжений в зонах превращений.

Обсуждаются природа и основные физические факторы реализации указанной выше моды деформации. Предполагается, что ее носителями являются не линейные или плоские дефекты типа дислокаций, дисклинаций или границ мартенситных фаз, а высокоэнергетические объемные образования - микрообъемы нестабильной фазы.

Фазовая нестабильность в полях высоких локальных напряжений приводит не только к реализации нового механизма деформации, но и, благодаря снижению модулей вблизи точек фазовых переходов, к потере устойчивости пластического течения в полосах локализации с активизацией дислокационно - дисклинационных и диффузионных мод деформации.

Моделирование гранулирования сыпучих материалов

Д.В. Лобовиков (Пермь)

В работе исследуются процессы гранулирования сыпучих материалов без добавления жидких связующих во вращающемся барабане гранулятора. В процессе гранулирования частицы сыпучего материала, расположенные около поверхности барабана, поднимаются вверх, увлекаемые поверхностью, затем, достигнув некоторой высоты, скатываются лавинообразно вниз. В результате взаимодействий частиц они слипаются, образуя конгломераты, которые затем приобретают округлую форму гранул. В опытах по изучению гранулирования сложно проследить какую-либо конкретную частицу или конгломерат частиц, математическое моделирование позволяет изучать гранулирование более подробно, полученные с помощью моделирования данные легче подвергаются анализу.

В работе представлена математическая модель гранулирования сыпучих материалов, которая описывает движение отдельных частиц и конгломератов частиц сыпучего материала.

Для реализации численного алгоритма математической модели применяется метод дискретных элементов в двумерной постановке, где элемент – частица.

Предполагается, что материал частиц обладает достаточной пластичностью для того, чтобы под действием сил сжатия, возникающих между частицами при гранулировании, возникли пластические деформации в площади контакта частиц. В площади контакта частиц, где напряжение больше предела текучести, имеет место полное прилипание. Исходя из этого предположения, аналитически получена упрощенная линейная зависимость силы адгезии контактирующих частиц от максимальной силы их сжатия за время взаимодействия. Полученная зависимость применяется в математической модели для расчета сил адгезии.

С помощью моделирования получены данные о движении частиц, о силах их взаимодействия, об образовании и разрушении конгломератов частиц. Моделирование показало, что конгломераты образуются около поверхности барабана, где давление в сыпучем материале максимально. Разрушаются конгломераты при попадании в места сдвига в сыпучем материале, под действием изгибающих сил, при ударе о поверхность барабана.

Акустический метод оценки прочности металлов и сплавов

А.Г. Лунев , Б.С. Семухин (Томск)

Известно, что скорость распространения ультразвука в металле в процессе его деформации изменяется сложным образом и зависит от структуры материала, общей деформации и напряжения течения. Особый интерес представляет зависимость скорости распространения ультразвука V_s от напряжения течения. Кривая состоит из трех четко выраженных участков, каждый из которых аппроксимируется прямой (с коэффициентом корреляции более 0.9). Подобные зависимости были получены для латуни (ЛС59-1), чистого кобальта, дюралюминия (Д16) в закаленном и состаренном состояниях, сталей 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД, Ст.3.

Для сравнения зависимостей скорости распространения ультразвука от напряжения течения кривые были построены в координатах: нормированная скорость звука от нормированного напряжения. Нормирование скорости осуществлялось скоростью ультразвука в ненагруженном образце, нормирование напряжения – временным сопротивлением, определяемым по диаграмме.

Наибольший интерес для исследования представляет первый участок зависимости скорости ультразвука от напряжения. На данном участке скорость ультразвука и напряжение линейно зависят от деформации. Следовательно, скорость ультразвука пропорциональна напряжению. Было выяснено, что для большинства цветных металлов характерно уменьшение скорости звука на первом участке, в то время как для сталей наблюдается слабый рост скорости.

Полученные при аппроксимации первого участка прямой линией коэффициенты дают возможность оценки прочности материала. Достаточно выразить временное сопротивление в полученном уравнении прямой линии, далее, зная коэффициенты, возможно в упругой области деформирования по изменению скорости ультразвука оценить прочность материала, не разрушая образец.

О переходе от обтекания тонкого профиля к течению вокруг плохообтекаемого тела

М.А. Лушников (Москва)

Асимптотика (при больших конечных числах Рейнольдса) двумерного стационарного решения краевой задачи об обтекании тонкого профиля в рамках уравнений Навье-Стокса описывается теорией пограничного слоя, течение оказывается безотрывным. Для плохообтекаемых тел, таких как, например, цилиндр, асимптотическая структура обтекания также известна: течение является отрывным, причем длина и ширина отрывной зоны растут пропорционально числу Рейнольдса. Вопрос о переходе от одного типа асимптотики к другому при изменении формы тела полностью не изучен и представляет теоретический интерес.

Исследование такого перехода можно провести, рассматривая задачу об обтекании решетки тел, расположенных поперек потока, когда расстояние между телами пропорционально числу Рейнольдса. Эта задача решается в рамках теории взаимодействия в так называемом компенсационном режиме, в котором давление вдоль области взаимодействия внешнего невязкого потока с вязким подслоем подстраивается таким образом, что толщина вытеснения оказывается постоянной.

Представлены некоторые результаты решения поставленной задачи и анализируется возможность применения интегральных методов расчета пограничного слоя и следа за обтекаемым телом.

Несимметричные конечные интегральные преобразования и их применения к нестационарным задачам вязкоупругости

С.А. Лычев (Самара)

Конечные интегральные преобразования (КИП) позволяют строить решения начально - краевых задач в классе вектор - функций, интегрируемых с квадратом, в замкнутой форме. При этом разрешающие функции представляются в виде полных ортогональных или биортогональных разложений. Сходимость подобных представлений для самосопряженных задач обеспечивается вариациями теоремы Гильберта-Шмидта. По этой причине КИП оказываются мощным инструментом для исследования нестационарных задач симметричной теории упругости и теории оболочек [1]. Вместе с тем, моделирование диссипативных систем приводит к построению несамосопряженных начально - краевых задач. К ним относятся задачи об изгибе вращающегося вязкоупругого стержня, о флаттере, шимми, задачи несимметричной теории упругости. Несмотря на то, что неортогональным разложениям посвящены обширные исследования, их реализация сопряжена с трудностями процедурного характера и необходимостью ее обоснования. Кроме того, диссипативные модели содержат, как правило, производные по времени различных порядков. Представления решений в этих случаях основаны на базисных функциях пучков несамосопряженных дифференциальных операторов.

В настоящей работе построен новый класс несимметричных матричных конечных интегральных преобразований, учитывающий указанные выше особенности. На его основе вводится и обосновывается процедура решения несимметричных начально - краевых задач. Разрешающие функции представляются в форме разложений по полным системам собственных и присоединенных векторов пучка несамосопряженных операторов. Суммирование осуществляется посредством специальных регуляризующих методов. Введенные таким образом представления используются для решения нестационарной задачи об изгибе вращающегося вязкоупругого стержня. Последний рассматривается в постановках гипотез Бернулли и теории типа Тимошенко (с учетом деформаций сдвига и инерции вращения). Устанавливается полнота соответствующих систем собственных и присоединенных функций. Исследуются спектральные характеристики, комплекснозначные собственные формы и связанные с ними обобщенные соотношения биортогональности. Осуществляется построение спектральных разложений для динамической реакции при нестационарных воздействиях, иллюстрирующих связность задачи.

1. Сеницкий Ю. Э. Исследование упругого деформирования элементов конструкций при динамических воздействиях методом конечных интегральных преобразований. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. 176 с.

Об устойчивости пылевого облака в плоском вертикальном слое

Д.В. Любимов, Т.П. Любимова, А.В. Штраубе (Пермь)

Гидродинамика потоков со взвешенными частицами интенсивно изучается уже в течение длительного времени. Однако взаимодействие дисперсных частиц с несущим потоком остается сравнительно мало изученным. Имеющиеся в литературе результаты касаются, в основном, влияния оседающих частиц на устойчивость конвективного равновесия и конвективных течений [1,2]. В статье [3] указано на возможность захвата частиц потоком, однако в этой работе не рассматривалось обратное действие частиц на поток. Последовательная теоретическая модель захвата частиц конвективным потоком с учетом их обратного влияния на несущий поток разработана в работе [4]. В частности показано, что существует стационарное состояние с распределением частиц в форме пылевого облака, возникающее в плоском бесконечном вертикальном слое при нагреве сбоку из состояния с равномерным распределением частиц.

В настоящей работе решена задача об устойчивости такого стационарного состояния. Ширина пылевого облака в стационарном состоянии зависит от теплового числа Грасгофа Gr, аналога концентрационного числа Грасгофа Gc и безразмерной скорости оседания S. Задача допускает преобразование, аналогичное преобразованию Сквайра, поэтому анализ устойчивости трехслойной системы с двумя деформируемыми поверхностями жидкость-взвесь проведен для плоских возмущений. Число Прандтля было фиксировано: $Pr = 1$.

В коротковолновом пределе для малой, но конечной ширины облака задача допускает аналитическое решение. Состояние с деформацией границ в противофазе является неустойчивым. В случае конечной ширины облака задача исследована численно, методом дифференциальной прогонки. Показано, что существует узкая область параметров, в которой стационарное состояние с распределением частиц в форме пылевого облака является устойчивым. В диапазоне исследованных значений параметра S наиболее опасными являются плоские ячеистые возмущения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы поддержки ведущих научных школ (грант № 00-15-96112) и CRDF (грант № PE-009-0).

1. Дементьев О.Н. ПМТФ. 1976. №3. С. 105-115.

2. Lyubimov D.V., Bratsun D.A., Lyubimova T.P., Roux B. Adv. in Space Res. V. 22. №8. 1998. P. 1267-1270.

3. Stommel H. J. Mar. Res. 1949. №8. P. 24-29.

4. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Штраубе А.В. Труды 3 Росс. национ. конф. по теплообмену. Москва, 2002. Т. 5. С. 258-261.

О длинноволновой конвекции в двухслойной системе с деформируемой границей раздела

Д.В. Любимов, С.В. Шкляев (Пермь)

Известно, что поверхность раздела двух жидкостей остается плоской при описании тепловой конвекции в рамках приближений Буссинеска [1]. Однако, как показано в [2], если жидкости обладают близкими значениями плотности, то возможно построение так называемых обобщенных приближений Буссинеска, корректно учитывающих деформацию границы раздела. В [2] также рассмотрена задача линейной устойчивости механического равновесия горизонтальной двухслойной системы с твердыми теплопроводными границами. В частности обнаружено, что в широком диапазоне параметров наиболее опасна длинноволновая мода. Слабо-нелинейное исследование крупномасштабной конвекции для данной задачи проведено в [3]. Получено амплитудное уравнение, показано, что конвекция возбуждается подкритическим образом.

В настоящей работе рассмотрены конечно-амлитудные крупномасштабные режимы тепловой конвекции в двухслойной системе. С помощью метода многих масштабов показано, что эволюция поверхности раздела описывается нелинейным уравнением диффузии с достаточно сложным незнакоопределенным коэффициентом диффузии.

С помощью интегральных соотношений получена область притяжения основного состояния. Если нижняя жидкость более тяжелая в изотермических условиях, то при любом подогреве снизу достаточно сильное отклонение поверхности раздела может вызвать незатухающее конвективное движение. Кроме того, возможно развитие неустойчивости в потенциально устойчивом случае (нижняя жидкость более тяжелая, нагрев сверху).

Показано, что нетривиальные решения амплитудного уравнения не являются дифференцируемыми. Так как производная отклонения поверхности раздела по продольной координате пропорциональна продольной компоненте скорости жидкости, описание вторичных конвективных течений с помощью полученного уравнения невозможно. Вблизи точек с бесконечной производной условия, в рамках которых получено амплитудное уравнение, не выполняются, и необходим более строгий анализ: возникают пограничные слои с достаточно интенсивным конвективным движением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-01-00701, и № 02-01-06581-мас), Программы поддержки ведущих научных школ (грант № 00-15-96112) и CRDF (грант № PE-009-0).

1. Джозеф. Д Устойчивость движений жидкости. М.: Мир, 1981. 638 с.

2. Лобов Н.И., Любимов Д.В., Любимова Т.П. Изв. РАН, МЖГ, 1996, N 2, С.32-39.

3. Любимов Д.В., Шкляев С.В. Изв. РАН. МЖГ. 2002. №4. С.44-55.

Численное моделирование процесса выращивания кристаллов полупроводников по методу VGF в присутствии вращающегося магнитного поля

Т.П. Любимова, О.А. Хлыбов (Пермь)

Одним из методов выращивания кристаллов полупроводников, активно применяющихся в настоящее время, является метод Бриджмена и одна из его модификаций, Vertical Gradient Freeze (VGF). Особенностью данного метода является неподвижность всех элементов печи; перемещение фронта кристаллизации осуществляется формированием теплового режима посредством нагревателей с независимым управлением.

Получению кристаллов с заданными свойствами могут препятствовать конвекция и искривление фронта кристаллизации. Для управления процессом роста кристалла активно применяются различные физические средства воздействия на течения в расплаве и распределение примесей, такие как вибрация, электрическое и магнитное поля.

Вращающееся магнитное поле (ВМП) является эффективным методом воздействия на течения электропроводящей жидкости, позволяющим существенно повлиять на структуру и интенсивность течения в расплаве, а, следовательно, и на распределение примеси в выращиваемом кристалле.

Настоящая работа посвящена численному исследованию процессов выращивания кристаллов GaAs и GaGe по методу VGF в присутствии ВМП.

Выполнен ряд численных экспериментов по исследованию распределения температуры и структуры течения в системах GaAs и GaGe в условиях, соответствующих методу VGF как в присутствии аксиально-симметричного ВМП, так и без него. Вычисления производились методом конечных разностей в приближении аксиальной симметрии задачи с учетом нестационарности процесса и искривления фронта кристаллизации. Использовался двухполевой метод; приведение неортогональной физической сетки к прямоугольной вычислительной осуществлялось с помощью преобразования координат. Исследование показало, что основной причиной искривления фронта кристаллизации в рассмотренных системах является различие теплопроводностей твердой и жидкой фаз, в результате чего фронт значительно искривляется даже при стационарных тепловых условиях на границе. В нестационарных тепловых условиях фронт искривляется еще больше. В этих условиях структура конвективного течения имела вид двух вихрей, расположенных вертикально один над другим. Меньший по размеру нижний вихрь способствует лучшему теплоотводу от фронта, что выражается в некотором уменьшении его прогиба. ВМП существенно деформирует течение, оттесняя верхний вихрь к верхней границе области, а нижний – к фронту, с одновременным увеличением их интенсивностей, что приводит к заметному уменьшению глубины прогиба фронта в процессе выращивания кристалла.

Мезомеханика процессов ударно-волнового деформирования и разрушения

П.В. Макаров (Томск)

Эксперименты и теоретические исследования последних десяти лет убедительно показали, что макроскопическая усредненная деформация и последующее разрушение всех без исключения материалов не могут быть описаны только на основе микроскопических механизмов. Фактически, макроскопический отклик материалов на нагружение есть процесс самоорганизации всей иерархии внутренней структуры. Разрушение материала при таком рассмотрении является завершающим этапом эволюции внутренней структуры материала, когда все деформационные каналы диссипации подводимой к материалу энергии исчерпаны и остается один – развитие повреждений разных масштабов и макроскопическое разрушение. В этом контексте создание иерархических моделей деформации и разрушения материалов представляется наиболее перспективным путем разработки адекватной теории пластичности и разрушения (как завершающего этапа) нагруженных материалов.

Ключевое значение при таком подходе играет мезоскопический уровень. Объектом изучения на нем является мезообъем нагружаемого материала. Поведение всех его локальных частиц определяется развитием микроскопических механизмов на микроуровне, а усредненное поведение *представительного мезообъема* эквивалентно поведению материала в целом при аналогичном способе нагружения. Следовательно, представительный мезообъем является макрочастицей нагружаемой сплошной среды в традиционном понимании. Все значимые для исследуемого процесса элементы внутреннего строения вводятся в рассмотрение явно. Особое место в зарождении и развитии локализованной пластической деформации играют поверхности и внутренние границы раздела различной физической природы (например, границы зерен, разных фаз и т.д.).

В обзоре представлены результаты моделирования зарождения и развития полос локализованного сдвига на свободных поверхностях кристаллов и границах зерен. Рассмотрены простейшие модели развития поворотов фрагментов структуры, когда активных систем скольжения недостаточно для деформационной аккомодации, обеспечивающей сплошность нагружаемой среды, и развитие поворотных мод деформации обеспечивает необходимую дополнительную аккомодацию. Применение развитого подхода к ударноволновому нагружению поликристаллических материалов позволило выявить тонкую структуру волновых фронтов, развитие во фронтах вихревого движения и формирование полос локализованной деформации мезоскопических масштабов, в которых пластическая деформация может в десятки раз превышать средние макроскопические значения. Особое значение подобные модели имеют при моделировании разрушения.

Расчет температурного поля в полупроводниковом стержне с током

О.И. Марков, О.А. Мызникова (Орел)

Задача о температурном поле в линейном проводнике с током уже рассматривалась [1]. Еще больший интерес с точки зрения практических приложений имеет задача о тепловых режимах в полупроводниковом стержне с учетом температурных зависимостей кинетических коэффициентов среды. С этой целью решалось стационарное уравнение теплопроводности с учетом выделения теплот Джоуля и Томсона, а также поглощения теплоты Пельтье на одном из концов стержня. Второй – горячий конец имел фиксированную температуру. Тепловым обменом мы пренебрегали. В такой постановке граничная задача является нелинейной, и поэтому для ее решения использовались численные методы. Так как важнейшим практическим применением решения данной задачи являются полупроводниковые ветви в термоэлектрических охлаждающих устройствах, то расчет проводился для термоэлектрических материалов с наиболее высокой термоэлектрической эффективностью. Были выбраны материалы на основе соединений теллуридов висмута и твердых растворов висмут - сурьма с 12 % сурьмы [2]. Кинетические коэффициенты аппроксимировались степенными полиномами с погрешностью не выше 3 %.

Одновременно проводилась оптимизация решения с целью получения максимального перепада температур и находился оптимальный ток. Максимального значения температура в этом температурном режиме достигала на горячем конце стержня. Проводился расчет температурного поля в случае наличия тепловых нагрузок на холодном конце стержня. Получены нагрузочные характеристики. В этом режиме максимум температуры перемещается по мере роста тепловой нагрузки от горячего конца к холодному.

Полученные решения позволяют с высокой точностью описать работу ветви термоэлемента в режимах максимального перепада температуры и максимальной холодопроизводительности в термоэлементе на базе теллуридов висмута и твердых растворов висмут-сурьма с учетом температурной зависимости теплофизических свойств.

1. О. И. Марков, В. И. Якушин. Тепловые режимы в проводнике с током и их устойчивость. В сб. "Конвективные течения". –Пермь. -1985. -Стр. 104-108.

2. О. И. Марков, О. А. Мызникова. Расчет термоэлектрической эффективности n-ветви на основе сплавов висмут-сурьма. //Международный семинар "Полупроводниковые материалы для термоэлектрических устройств и солнечной энергетики". Сб. докладов. Москва. -ИМЕТ РАН. -2002. -Стр. 61.

Математическая модель эволюции остаточных напряжений в неоднородно легированном стеклующемся материале

В.П. Матвеенко, А.Н. Труфанов (Пермь)

Разрабатывается математическая модель термомеханического поведения материалов с релаксационным переходом в приложении к решению задачи о формировании и эволюции полей напряжений в неоднородных температурных полях при охлаждении конструкции, изготовленной из неоднородно легированного стеклующегося материала.

Особенность данного класса изделий состоит в том, что причиной возникновения остаточных напряжений является несовместность деформаций, вызываемая не только неравномерностью разогрева по толщине, но и неоднородностью термомеханических свойств материала, вызванной внесением легирующих добавок с переменной концентрацией. Для расчета технологического напряженно - деформированного состояния требуются новые физические модели, позволяющие минимальным числом экспериментальных параметров с достаточной точностью описывать эффекты размягчения и отверждения при релаксационных переходах. В частности, для низкомолекулярных стекол с переходом из стеклообразного в вязкотекучее состояние удобно использовать модели максвелловского типа.

Предложены определяющие соотношения термомеханического поведения стеклующейся среды в температурном диапазоне, включающем вязкотекучее и стеклообразное состояние материала. По данным литературных источников, получены сплайн - аппроксимации зависимостей параметров предложенной модели от концентрации примесей для двухкомпонентной кварцевой смеси. В численном эксперименте исследована зависимость температуры стеклования от концентрации и скорости охлаждения - нагрева при термомеханических испытаниях.

Поставлена в общем виде проблема формирования технологического напряженно - деформированного состояния, включающая раздельное решение нестационарной тепловой и механической задачи в рамках теории малых деформаций.

Разработанная математическая модель применена для численного анализа технологических и остаточных напряжений в неоднородно - легированных кварцевых стержнях, применяющихся в заготовках анизотропных оптических волокон. Исследовано влияние функций распределения неоднородности легирующих элементов на закономерности формирования остаточных напряжений.

О многомасштабности процесса разрушения

С.В. Мельников, И.А. Пантелеев (Пермь)

В [1,2] показано, что в процессе деформирования - разрушения структурно - неоднородная среда как термодинамическая система локально будет стремиться к структуре, обеспечивающей минимум “нерационального” расхода энергии. Такие структуры должны соответствовать трем случаям: полностью однородному бесструктурному состоянию классической механики деформируемого твердого тела, однородному деформированному состоянию (модель Фойгта) и однородному напряженному состоянию (модель Рейсса), которые и выбираются в качестве дискретно - непрерывных структурных элементов соответствующего масштабного уровня. Такой многомасштабный подход для построения математических моделей физических явлений соответствует идеям развивающегося нестандартного анализа [3].

Неоднородность жесткостных характеристик элементов в модели Рейсса, случайная неоднородность прочностных свойств элементов в модели Фойгта, а также дискретность многомасштабной структуры на этих уровнях являются источниками появления самоорганизации, когда накопленная в точках Фойгта деформация “на конкурсной основе” перераспределяется в соответствии со случайным дискретным изменением их жесткостных свойств. Такая “борьба за деформацию” между точками Фойгта включает в себя этапы: разрушения (накопления повреждений), деформирования как результат внешнего воздействия на систему, установления локального равновесного расстояния. При моделировании эволюции системы предполагается, что скорости этих процессов различны.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96479).

1. Мельников С.В. Инфинитеземальный метод исследования в приложении к задачам механики структурно-неоднородных сред, Препринт. Пермь: Институт механики сплошных сред УрО РАН, 2001, 26 с.

2. Мельников С.В. Инфинитеземальный метод построения определяющих соотношений для структурно-неоднородных сред с повреждаемой структурой. Часть 1 / Физическая мезомеханика – 2002.-Т.5.-№3.-С.53-61.

3. Альбеверио С., Фенстад Й., Хуэг-Крон Р., Линдстрем Т. Нестандартные методы в стохастическом анализе и математической физике. – М.: Мир, 1990. – 616 с.

Численное моделирование крупномасштабной магнитной структуры в сферической капле магнитной жидкости

В.В. Мехоношин (Дрезден), А.Ф. Пшеничников (Пермь)

В работе исследуется влияние конечных размеров образца на результаты Монте-Карло моделирования дипольных систем. Преодоление эффектов, связанных с конечными размерами моделируемой ячейки, и достижение термодинамического предела – одна из главных проблем, возникающих при численном моделировании. В случае однородных систем эта проблема решается обычно с помощью периодических граничных условий (ПУ) и суммирования по Эвальду. Однако в случае дипольных систем использование ПУ приводит к неконтролируемому изменению свойств самой системы, так как ПУ запрещают крупномасштабные флуктуации параметров системы и их монотонное изменение в пространстве. В частности, ПУ не позволяют обнаружить крупномасштабные структуры, предсказываемые в рамках метода функционалов плотности. В данной работе мы отказались от использования ПУ. Предметом исследований является сферическая капля магнитной жидкости со свободной границей. Исследуется внутренняя магнитная структура системы, формирующаяся за счет магнитодипольных межчастичных взаимодействий, описываются поверхностные и объемные эффекты.

Исследуется система с высокой объемной концентрацией (0.34 - 0.5) суперпарамагнитных частиц. Это позволило нам избежать фазового расслоения системы и добиться воспроизводимости результатов. В качестве параметров порядка, характеризующих магнитную структуру системы, были выбраны среднеквадратичные значения радиальной и тангенциальной компоненты магнитного момента частиц. С этой целью шар был разбит на 300 концентрических слоев одинакового объема. Параметры порядка вычислялись для каждого слоя независимо. Было обнаружено, что ориентационная структура в пограничном слое (на толщине порядка диаметра частицы) существенно отличается от структуры в объеме. В пограничном слое магнитные моменты ориентированы преимущественно вдоль свободной поверхности. Изменения параметров порядка коррелируют с радиальной функцией распределения частиц. В нулевом поле поверхностный эффект ослабевает с увеличением размера системы. По мере увеличения энергии магнитодипольных взаимодействий в системе спонтанно образуется глобальная магнитная структура. В средней части капли магнитные моменты выстраиваются преимущественно в радиальном направлении, но вблизи поверхности наблюдается поворот моментов и формирование пограничного магнитного слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 01-02-17839 и № 02-03-33003) и CRDF (грант № PE-009-0).

Экспериментальное исследование влияния характеристик газовой фазы на устойчивость и структуры течения в двухслойной системе жидкость-газ

А.И. Мизёв (Пермь)

Как известно [1], термокапиллярный механизм наряду со свободно - конвективным может служить причиной неустойчивости подогреваемого снизу слоя жидкости со свободной верхней границей. При решении такой задачи обычно предполагается, что слой жидкости граничит с полубесконечным слоем газа, тепловыми и вязкими свойствами которого обычно пренебрегают. Учёт свойств газовой фазы сводится к варьированию граничных условий для температуры на верхней границе слоя жидкости. Решение задачи в такой классической постановке показывает, что наиболее опасны возмущения, приводящие к возникновению гексагональной, ячеистой структуры течения, что хорошо подтверждается результами экспериментальных исследований. Однако, как показывает обзор работ по данной тематике, имеется целый ряд экспериментальных исследований, в ходе которых наблюдались и другие надкритические структуры течения. Авторами работ было предложено несколько возможных причин расхождения с теорией, одна из которых предполагает необходимость учёта характеристик газовой фазы. Авторы работы [2] теоретически исследовали влияние соотношения размеров и теплопроводностей газовой и жидкой фазы на порог устойчивости и пространственно - временные характеристики конвективных течений, возникающих в слое жидкости. В работе сделан вывод об уменьшении критического числа Марангони при уменьшении толщины газовой фазы и смещении наиболее опасных возмущений в длинноволновую область. В работе также приведена карта устойчивости, иллюстрирующая области существования различных надкритических течений.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния характеристик газовой фазы на устойчивость и структуры течения в двухслойной системе жидкость - газ. Эксперименты показали, что уменьшение толщины газового слоя приводит к уменьшению критического градиента температуры. Появляющееся при этом конвективное течение имеет гексагональную структуру при любых значениях отношения толщин слоёв.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96407) и Американского фонда гражданских исследования и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009 и).

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости//Москва, Изд-во «Наука», 1972, 392 с.

2. Golovin A.A., Nepomnyashchy A.A., Pismen L.M. Pattern formation in large-scale Marangoni convection with deformable interface//Physica D. 1995. V. 81 (1-2), P. 117-147.

Применение вейвлет-анализа и метода Δ-вариаций для спектрального и корреляционного анализа галактических изображений

И.А. Мизёва, И.А. Патрикеев, П.Г. Фрик (Пермь)

Выбор математического аппарата для изучения спектральных свойств астрономических изображений имеет важное практическое значение. Существует ряд методов выделения доминирующих масштабов и оценки наклона спектра: вычисление структурных функций, фурье - анализ, корреляционный анализ, вейвлет - анализ. Традиционный метод Фурье дает спектр, в котором очень сложно выделить реально доминирующий масштаб. Структурные функции имеют слабое спектральное разрешение и дают гладкий скейлинг даже для полей, имеющих дискретный спектр. В [1] на примерах реальных астрономических изображений (галактика NGC 6946) показано, что вейвлет - анализ позволяет получить удовлетворительные спектральные характеристики реальных изображений. Подходящий выбор анализирующего вейвлета приводит к получению сглаженного спектра с хорошо различимым доминирующим масштабом. В настоящее время в астрономии активно применяется метод Δ - вариации и метод вариации Алана, которые являются частным случаем вейвлет - преобразования [2]. Метод вариации Алана аналогичен вейвлет - преобразованию с анализирующим вейвлетом типа функции Хаара, а Δ - вариация аналогична вейвлету, известным под названием «французская шляпа».

В докладе проводится количественное сравнение перечисленных методов анализа структуры изображений на тестовых примерах и реальных данных наблюдений внешних галактик.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96493) и АФГиР НОЦ-009.

1. P. Frick, R. Beck, E. M. Berkhuijsen and I. Patrickeyev Scaling and correlation analysis of galactic images// Mon. Not. R. Astron. Soc. 327, 1145–1157 (2001)

2. M.Zelensky and J.Stutzki The relation of the Allan- and Δ-variance to the continuous wavelet transform//Asrton. Astrophys. 347, 630-633 (1999)

Разрушение образца в испытательной машине при циклическом нагружении

В.И. Миронов, А.В. Якушев (Екатеринбург)

Анализ поведения системы машина - образец методом теории катастроф дает качественно новую информацию о предельном состоянии материала. Переход процесса накопления повреждений в стадию неуправляемого разрушения представляется как катастрофический скачок, связанный с потерей устойчивости системы. Момент потери устойчивости определяется не только свойствами материала образца, но и способом нагружения, а также геометрическими параметрами системы. Один и тот же материал может разрушиться при разной степени поврежденности, что важно для установления предельного состояния и формулировки критерия разрушения.

Рассматривается взаимосвязь критериев однократного и усталостного разрушения через введение в рассмотрение модели деградации полной статической диаграммы. Параметры падающей ветви такой диаграммы, связанные с накоплением и развитием микродефектов, изменяются при появлении усталостных повреждений. Экспериментально установлено, что располагаемая пластичность, определяемая длиной полной диаграммы, прямо связана с уровнем циклических свойств материала. Деградация свойств, наблюдаемая в механическом эксперименте, объясняется переходом пластичного материала в хрупкое состояние, что вполне согласуется с физическими представлениями о природе усталости.

Поведение циклически тренированного образца в машине исследуется тем же методом теории катастроф. С ростом числа циклов наблюдается смещение бифуркационных кривых в пространстве управления. В зависимости от характера вырождения катастрофа надвигается на путь циклирования или уходит с него, исключая динамическое разрушение образца. В общем случае усталостное разрушение образца связано с потерей устойчивости системы машина - образец, как и при однократном нагружении. Первоначально безопасные параметры цикла с вырождением свойств материала становятся критическими.

Приводятся числовые примеры расчета остаточной несущей способности и ресурса элементов конструкций на основе данных о разрушении образца в испытательной машине при циклировании.

Экспериментальное изучение образования диссипативных структур и возникновения динамической стохастичности при циклическом нагружении металлов

Е.В. Михайлов, С.В. Уваров (Пермь)

Изучение явления локализации пластической деформации, в том числе и индуцированной фазовым переходом, имеет важное прикладное и фундаментальное значение. Во многих случаях переход к пластичности и разрушению сопровождается появлением диссипативных структур. Например, зон локализованного разрушения (зеркальных зон) при отколе и распространении трещин [1,2] фронтов фазового перехода [3].

Образцы из стали 35CD4 закалённые, а затем отожжённые при температуре 550 °C в течение 1 часа, были подвергнуты полностью симметричному циклическому изгибу при частоте 56 Гц. Предел усталости для этого материала 530±30 МПа. Испытания проводились при 660 МПа. Время жизни составляло в среднем $5x10^4$ циклов. Температура поверхности измерялась при помощи инфракрасной камеры производства CEDIP, имеющей следующие параметры: частота кадров до 500 Гц, разрешение 320x240, точность измерения температуры 0,1 °C. В ходе экспериментов было обнаружено, что зарождению усталостных трещин предшествует локализация выделения тепла в области зарождения и возникновение пространственной корреляции температуры с возникновением динамического хаоса. При исследовании поверхности при помощи NewView было обнаружено следующее: усталостное повреждение металла первоначально проявляется в виде полос локализованного сдвига. Причём эти полосы обнаружены при амплитудах напряжения 80% от предела усталости. В областях, где произошло зарождение трещины, концентрация этих полос выше, и они образуют структуры более крупного масштаба. Это позволяет сделать вывод о том, что усталостное разрушение происходит при достижении определённой концентрации полос, при которой становится значимым их взаимное влияние, что приводит к появлению коллективных мод и возникновению диссипативных структур в виде очагов с взрывообразной кинетикой зарождения полос локализованной деформации, а затем и возникновению трещины.

1. Наймарк О.Б., Баранников В.А., Давыдова М.М., Плехов О.А., Уваров С.В. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины // Письма в журнал технической физики, 2000. т. 26. № 6. С. 67-77.

2. Marder M., & Gross S. Origin of crack tip instabilities // J. Mech. Phys. Solids, 1995. №43. P 1- 48.

3. J.A.Shaw, S.Kyriakides. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy.// Acta Mater. 1997. V.45. P. 683-700

Расчет сопротивления решеток затупленных тел при умеренных числах Рейнольдса

И.В. Моренко (Казань)

Проведено численное моделирование внешнего отрывного обтекания решеток при умеренных числах Рейнольдса, когда за каждым ее элементом формируется ламинарная стационарная вихревая зона. Уравнения Навье-Стокса в переменных функция тока - вихрь - давление решаются методом конечных элементов [1].

Рассмотрены решетки с прутками поперечного сечения в форме круга, квадрата, ромба, пластины и эллипса, ориентированного поперек и вдоль потока, а также симметричного профиля Жуковского. Шаг решетки варьируется в интервале от 2 до 20, число Рейнольдса - от 1 до 40.

С помощью численных экспериментов установлены зависимости коэффициентов сопротивления трения и давления, длины вихревой зоны и положения точки отрыва потока от числа Рейнольдса и шага решетки. Полученные результаты вполне согласуются с известными данными натурных экспериментов и численными результатами других авторов.

Результаты расчетов обобщены в виде универсальной формулы для коэффициента сопротивления произвольной решетки.

Проведенная серия расчетов показала, что для тел, вытянутых вдоль потока, сопротивление обусловлено, главным образом, силами трения, в то время как для тел, ориентированных поперек потока, определяющим является коэффициент сопротивления давления.

1. Мазо А.Б. Задачи внешнего обтекания тел несжимаемой жидкостью при умеренных числах Рейнольдса // Актуальные проблемы механики сплошной среды. Казань: ИММ КазНЦ РАН. 2001. С.192-207.

О возникновении дальнего ориентационного порядка в магнитных коллоидах

К.И. Морозов (Пермь)

Построена общая теория возникновения спонтанного магнитного упорядочения в системе взаимодействующих сферических диполей в результате бифуркации однородного изотропного распределения диполей по ориентациям – решения первого уравнения цепочки Боголюбова, записанного в терминах прямой корреляционной функции. Сформулирован формальный критерий для точки бифуркации, являющийся уравнением для точек Кюри системы, и показано, что все существующие теории, включая теорию функционала плотности, являются фактически лишь теориями эффективного поля Вейсса и не применимы для описания перехода второго рода в системе. Установлено, что такой переход инициируется исключительно близкодействующими корреляциями, а дальнодействующие корреляции хоть и способствуют переходу, несколько понижая порог перехода, но в целом играют второстепенную роль. Учет близкодействующих корреляций в рамках обобщенной среднесферической модели позволил аналитически рассчитать функциональную зависимость точек Кюри от концентрации жидкости, амплитуды и радиуса короткодействующего потенциала и ланжевеновской восприимчивости жидкости.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 02-03-33003).

Неосесимметричное динамо в тесных двойных системах

Д. Мосс (Манчестер), Н. Пискунов (Упсала), Д.Д. Соколов (Москва)

Рассматривается генерация неосесимметричных магнитных полей в тесных двойных системах. Механизм генерации основан на совместном действии дифференциального вращения и спиральности конвективных движений. Причина нарушения аксиальной симметрии магнитных полей связана с нарушением аксиальной симметрии генераторов магнитного поля, связанной с неравномерным нагревом данной звезды ее звездой - компаньоном, а также приливными взаимодействиями. Конкретно мы рассматриваем возмущения средней спиральности и оцениваем степень возможной анизотропии для параметров, типичных для двойной системы ER Vulpeculae. Численное исследование уравнений генерации магнитного поля показало, что ожидаемая степень анизотропии спиральности, действительно, достаточна для возбуждения сильно неосесимметричных магнитных конфигураций. В частности, оказывается возможным резонансное возбуждение сильно неосесимметричной моды при подходящем согласовании скорости дифференциального вращения звезды и скорости обращения звезды - компаньона.

Многостепенные динамические стенды полунатурного моделирования из композиционных материалов

Р.М. Мулюков (Казань), К.З. Хайрнасов, Р.С. Якушев (Москва)

Доклад посвящен проблеме проектирования, статического расчета и алгоритмам статического и динамического анализа многостепенных динамических стендов полунатурного моделирования из композиционных материалов. Приведены методология и алгоритмы, позволяющие проектировать и исследовать стенд на статические и динамические нагрузки; определять частотные характеристики стендов различных комплектаций из композиционных материалов. В качестве методов решения задач использовались: моделирование на САПР CATIA, метод конечных элементов и аналитические методы. Многостепенные динамические стенды полунатурного моделирования представляют собой сложную пространственную конструкцию. Основное назначение этих стендов - имитировать полетные характеристики в наземных условиях. Одними из основных параметров, характеризующих эффективность работы многостепенного динамического стенда, являются его инерционные характеристики, вследствие чего стенды изготавливаются, в основном, из материалов, имеющих высокую удельную прочность. А наибольшую удельную прочность имеют композиционные материалы, выполненные из высокопрочных волокон и связующих. Известно, что удельная прочность композиционных материалов в несколько раз превосходит удельную прочность однородных материалов. В тоже время композиционные материалы, широко применяемые в авиации и дающие значительные преимущества по сравнению с традиционными материалами, не использовались при проектировании и производстве многостепенных динамических стендов. Соответственно, не проводился статический расчет и анализ стендов из композиционных материалов при действии статических нагрузок и различном расположении слоев композита. Поэтому проектирование и расчет многостепенных динамических стендов из композиционных материалов является достаточно важной и актуальной проблемой.

Объектом наших исследований являются: отработка методов проектирования и анализа подобных стендов; разработка методологии моделирования, проектирования статического расчета и анализа самих стендов.

Документированные последовательности моделирования, проектирования и статического расчета на САПР высокого уровня позволяют решать следующие задачи: определение напряженно - деформированного состояния стендов из композиционных материалов; исследование влияния расположения слоев композиционного материала на прочностные и жесткостные характеристики стенда; моделирование и проектирование стендов из композиционных материалов на САПР высокого уровня.

Напряженно-деформированное состояние структурных составляющих при деформации сложнолегированной латуни

М.В. Мясникова, С.В. Смирнов, А.Н. Солошенко, А.В. Тропотов (Екатеринбург)

Материалы, обрабатываемые методами пластической деформации, являются многофазными, т.е. состоят из частиц (зерен) отдельных фаз или структурных составляющих, резко различающихся по своим механическим и пластическим характеристикам. В зависимости от содержания той или иной фазы в сплаве, а также конфигурации ее частиц, можно получать различные распределения свойств в объеме металла.

Доклад посвящен поиску оптимальной микроструктуры легированной латуни, предназначенной для изготовления деталей, используемых в автомобильной промышленности. Исследуемый сплав содержит три структурные составляющие: α-твердый раствор цинка и легирующих элементов в меди; $\alpha+\beta$ - эвтектоидная смесь; а также интерметаллиды стехиометрического состава $(Fe, Mn)_5Si_3$. Напряженно - деформированное состояние (НДС) определяли на основе двухуровневой концепции решения краевой задачи: на макроуровне задача решается для однородного материала с определением кривых нагружения; на мезоуровне материал рассматривается как кусочно - однородный континуум, состоящий из системы взаимосвязанных частиц (структурных составляющих), имеющих различные механические свойства. Численное решение задачи осуществляли методом конечных элементов.

В результате получили различные распределения деформации между структурными составляющими в мезоячейке для разных случаев нагружения (растяжение, сжатие, простой сдвиг и др.). Найдены статистические функции распределения характеристик НДС в объеме металла, а также корреляционные зависимости между относительной долей содержания интерметаллидов и статистическими характеристиками НДС.

Течение жидкости с пузырьками в канале с тепловыделяющими стенками

С.И. Назарова (Казань)

Рассматривается задача о течении жидкости в прямолинейном канале с заданным на стенке потоком тепла. При достижении температуры кипения в жидкости начинают образовываться паровые пузырьки. Данная задача служит для оценки процессов, проходящих в системах охлаждения, в частности, для нахождения условий, при которых жидкость обеспечивает отвод тепла вдоль всей рабочей части канала.

Область течения разбивается на две зоны. В первой из них температура жидкости всюду меньше температуры фазового перехода. Здесь решается задача конвективного теплопереноса в несжимаемой жидкости. В результате находится начало второй зоны, где движется жидкость с пузырьками. Здесь используется схема идеального поперечного перемешивания среды. Зависимость плотности смеси от давления подчиняется модели Когарко [1]. Из уравнения баланса энергии следует зависимость между скоростью образования пузырьков и потоком тепла на стенке. В итоге получается замкнутая система нелинейных дифференциальных уравнений для определения давления и концентрации пузырьков вдоль канала.

Задача приведена к безразмерному виду, и проведен параметрический анализ полученного решения.

1. Когарко Б.С. Об одной модели кавитирующей жидкости. ДАН СССР, 1961, т.137, № 6.

О динамическом скейлинге в ансамблях мезодефектов и некоторых нелинейных проблемах пластичности и разрушения

О.Б. Наймарк (Пермь)

Исследование взаимосвязи коллективных свойств ансамблей дефектов, пластичности и разрушения становится одной из ключевых проблем нелинейной физики при рассмотрении деформируемых сред как систем, далеких от термодинамического равновесия. Последнее является следствием сильных пространственных корреляций в ансамблях дефектов, которые приводят к зарождению коллективных мод различной природы и скейлингу, понимание которого может привести к объяснению механизмов пластичности, разрушения, эффектов неустойчивости деформирования, аномалий деформационных реакций материалов.

Многополевой статистический подход позволил определить типы коллективных мод в ансамблях мезодефектов в соответствии с симметрией параметров порядка, описывающих дефекты, и структурой гамильтониана, отражающего специфику взаимодействия в ансамбле и роль исходных структурных масштабов. Показано, что пластичность и разрушение могут рассматриваться как структурные переходы с различными типами динамического скейлинга в соответствии с типом установленных мод, проведен анализ дисперсионных механизмов, контролируемых температурой и структурой материала, предложено развитие феноменологии Гинзбурга-Ландау для рассматриваемых классов явлений.

Развитый подход был использован для теоретического и экспериментального изучения стохастической динамики трещин, эффектов скейлинга при разрушении, объяснению резонансного возбуждения разрушения (“волны разрушения”) и автомодельной структуры пластических волн при ударно - волновом нагружении.

Сферическое тело в магнитной жидкости в скрещенных электрическом и магнитном полях

В.А. Налетова, А.Н. Тятюшкин (Москва)

На покоящееся сферическое тело, погруженное в однородную безграничную магнитную жидкость, в однородном постоянном магнитном поле [1] (и в однородном постоянном электрическом поле [2]) не действуют ни сила, ни момент сил. Если же магнитное и электрическое поля действуют одновременно, и при этом векторы их напряженности не параллельны, то и в самом теле, и в окружающей его жидкости появляется объемная сила - сила Лоренца. Эта сила может вызвать течение магнитной жидкости. На тело в этом случае может действовать сила и момент сил. Цель данной работы - вычислить силу и момент сил, действующих на тело, а также скорость и давление жидкости в стационарном течении. Рассматривается твердое покоящееся слабопроводящее намагничивающееся сферическое тело, погруженное в однородную несжимаемую слабопроводящую вязкую магнитную жидкость. Тело и окружающая его жидкость находятся в приложенных постоянных однородных магнитном и электрическом полях H_a и E_a. Электропроводность и магнитная проницаемость вещества тела и жидкости предполагаются постоянными.

Найдены давление и поле скоростей жидкости в стационарном течении. Скорость может быть представлена в виде суперпозиции скоростей va и vs. Поле скоростей va симметрично относительно оси, проходящей через центр сферы параллельно вектору Ha×Ea, и для него найдена функция тока. Поле скоростей vs обладает тем свойством, что каждая его линия тока целиком лежит на сфере, центр которой совпадает с центром сферического тела. Семейство линий тока, лежащих на одной сфере, имеет шесть точек покоя. Четыре точки покоя расположены на пересечениях сферы с двумя взаимно перпендикулярными осями, проходящими через центр сферы параллельно векторам l1+l2 и l1–l2, где l1=Ea/Ea и l2=Ha/Ha, и являются особыми точками типа центр. Две оставшиеся точки покоя расположены на пересечениях сферы с осью, проходящей через центр сферы перпендикулярно векторам l1 и l2, и являются седлами. Найдены сила и момент сил, действующие на тело со стороны жидкости. Показано, что сила пропорциональна вектору Ha×Ea, знак коэффициента пропорциональности определяется проводимостями и магнитными проницаемостями вещества тела и жидкости.

1. Р. Розенцвейг. Феррогидродинамика. – М: Мир, 1989

2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Электродинамика сплошных сред. – М: Наука, 1982.

Разработка визуализации и управления в конечно-элементном комплексе ACELAN

А.В. Наседкин, А.Л. Петушков, А.Н. Соловьев (Ростов-на-Дону)

ACELAN (ACoustic ELectrical Analisys) [1, 2], разрабатываемый на кафедре математического моделирования РГУ, является специализированным конечноэлементным комплексом для решения задач, моделирующих функционирование пьезоэлектрических устройств, возможно, контактирующих с акустическими средами. В последней версии реализованы расчеты всех важных в практических приложениях режимов (статический, гармонический и модальный анализ, а также нестационарные воздействия) в плоской и осесимметричной постановке, а также для тел обобщенной цилиндрической формы.

Отличительной особенностью этого комплекса является "дружелюбный интерфейс", который содержит удобный графический редактор, пополняемую базу материалов, окно визуального контроля качества неструктурированной конечноэлементной сетки и окно визуальной постпроцессорной обработки результатов. С использованием управляющей оболочки можно, во-первых, моделировать конструкции и проводить расчеты при минимальных инструкциях пользователя, а во-вторых, в течение сеанса менять типы режимов, геометрию конструкции, граничные условия, набор материалов и их свойства, а также конечноэлементное разбиение.

Этот сервис опирается на разработку визуализации графической информации и управление модулями комплекса с помощью современных средств DirectX 6 и OpenGL. Для пакетной работы с комплексом создан командный язык и возможность взаимодействия со сторонними приложениями посредством COM-интерфейсов [3]. Формат обмена данными совместим с XML. Модульная архитектура комплекса позволяет легко добавлять новые блоки (триангуляторы, решатели) и использовать существующие по отдельности.

1. Белоконь А.В., Наседкин А.В., Соловьев А.Н. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств // ПММ. 2002. Т. 66 , № 3. С. 491-501.

2. Белоконь А.В., Наседкин А.В., Никитаев А.В., Петушков А.Л., Скалиух А.С., Соловьев А.Н. Новая версия пакета ACELAN для проведения расчетов пьезоизлучателей и пьезоприемников акустических волн // Пьезотехника-2002. Межд. научно-практич. конф. «Фундамент. проблемы пьезоэлектрич. приборостроения». Тверь, 17-21 сент. 2002 г. Сб. докл. Тверь, ТвГУ, 2002. С.171-179.

3. Петушков А.Л. Создание языка команд для пакетного режима работы КЭ комплекса ACELAN // Тр. I Шк.-семинара «Математич. моделирование, выч. механика и геофизика», Ростов-на-Дону, 14-18 окт. 2002. / Ростов-на-Дону: изд-во «Новая книга», 2002. С. 141-143.

Обобщение уравнения Плессета для несферических колебаний газового пузырька в жидкости

Э.Ш. Насибуллаева (Уфа)

Выведено уравнение, обобщающее уравнение Плессета [1], которое описывает несферические движения одиночного газового пузырька в идеальной несжимаемой жидкости. Считается, что в начальный момент времени имеется сколь угодно малое отклонение от сферической формы поверхности пузырька, тогда при изменении давления в жидкости пузырек начинает колебаться с нарушением сферической симметрии. Форма поверхности пузырька берется в виде эллипсоида вращения. При выводе принимались во внимание члены, содержащие квадраты амплитуды несферического возмущения поверхности пузырька, в то время как при выводе уравнения Плессета учитывались только линейные члены.

На основе полученных уравнений были проведены численные расчеты несферических колебаний пузырька. Сравнение с результатами, полученными по уравнению Плессета, показало, что при достаточном увеличении амплитуды возмущения начинают сказываться нелинейные члены, которые ограничивают решение. Также был проведен сравнительный параметрический анализ выведенной системы уравнений для различных параметров (начальное отклонение от сферы, амплитуда давления, начальный радиус) и для различных законов изменения приложенного давления.

1. Plesset M.S. On the stability of the fluid flow with spherical symmetry // J. Appl. Math. – 1954. – V.25, N.1.

Особенности моделирования процессов распространения выбросов в приземном слое атмосферы с использованием ANSYS/Flotran

Р.И. Натхина (Ростов-на-Дону)

Исследуются процессы распространения примесей в пограничном слое атмосферы с использованием метода конечных элементов. Для построения решения задачи применяется конечноэлементный комплекс ANSYS/Flotran.

Модуль Flotran конечноэлементного комплекса ANSYS позволяет решать различные гидро- и аэродинамические задачи, включая задачи о распространении примесей, в том числе и задачи об исследовании процессов распространения выбросов в приземном слое атмосферы. Имеется возможность учитывать тепломассоперенос и турбулентность. В этом случае модуль ANSYS/Flotran использует уравнения непрерывности для каждой примеси, уравнение Навье-Стокса и уравнение энергии.

Рассматривается несколько тестовых задач: с одним источником выброса и одной примесью, с одним источником выброса и двумя примесями, с двумя источниками выброса, решенными при разных граничных условиях. Для сравнения результатов рассмотрен тестовый пример, решенный в конечноэлементных пакетах ANSYS/Flotran и FlexPDE.

Тестовые примеры рассматривались как в горизонтальном, так и в вертикальном слое атмосферы. Особенностью задачи, рассматриваемой в вертикальном слое атмосферы, является проблема моделирования стратификации температуры, давления и скорости ветра. Для решения этой задачи температура, скорость ветра и давление (в случае отсутствия ветра) задаются в граничных условиях с учетом их зависимости от вертикальной координаты с использованием встроенного языка APDL по стратификационным или барометрическим формулам [1,2]. Результаты работы частично опубликованы в [3]. Получены графики распределения концентраций примесей в различные моменты времени после выброса.

Автор выражает благодарность Наседкину А.В. за внимание и помощь в работе.

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985

2. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. – М.: Издательство МГУ, 1986

3. Натхина Р.И. Решение нестационарной задачи о распространении выбросов от двух источников в горизонтальном слое атмосферы с использованием в ANSYS/Flotran// Матем. моделирование, выч. механика и геофизика. Тр. I Шк-сем., Ростов-наДону, 14-18 октября 2002. – Ростов-на-Дону: Новая книга,2002

Неустойчивость состояний покоя невязкой сжимаемой идеально проводящей среды со свободной поверхностью в магнитном поле

М.-Б.А. Негматов (Новосибирск)

Исследуется задача линейной устойчивости состояний покоя невязкой сжимаемой бесконечной по проводимости среды, содержащей магнитное поле. Область течения среды полностью окружена некоторой вакуумной прослойкой и отделена ею от внешних проводников, которые представляют собой твердый, неподвижный, идеально проводящий кожух. Движение среды описывается уравнениями одножидкостной идеальной магнитной гидродинамики, дополненными краевыми условиями на границах раздела "среда - вакуум" и "вакуум - кожух". Уравнение состояния среды считается произвольным.

Прямым методом Ляпунова показано, что данные состояния покоя неустойчивы по отношению к малым пространственным возмущениям, которые уменьшают эффективную потенциальную энергию, являющуюся суммой внутренней энергии среды и энергии магнитного поля. Получены априорные двусторонние оценки экспоненциального роста малых возмущений, причем показатели экспонент в этих оценках непосредственно вычисляются по параметрам состояний покоя и начальным данным для возмущений.

Следует отметить, что результаты настоящей работы служат естественным развитием и обобщением известных результатов [1-4] на новые магнитогидродинамические равновесия плазмы.

1. Кадомцев Б.Б. Гидромагнитная устойчивость плазмы // Вопросы теории плазмы. 1963. Вып. 2. С. 132-176.

2. Губарев Ю.Г. К обращению теоремы Лагранжа в магнитной гидродинамике // ПММ. 1990. Т. 54. Вып. 6. С. 988-991 .

3. Губарев Ю.Г., Ковылина С.С. Неустойчивость состояний покоя идеальной проводящей среды в магнитном поле // ПМТФ. 1999. Т. 40. № 2. С. 148-155.

4. Губарев Ю.Г., Негматов М.-Б.А. К неустойчивости состояний покоя вязкой идеально проводящей сжимаемой среды, содержащей магнитное поле // ПММ. 2000. Т. 64. Вып. 4. С. 644-650.

Каскадные процессы переноса энергии магнитного поля за счет эффекта Холла

В.А. Некрасов, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик (Пермь)

В проводящей среде на эволюцию сильного магнитного поля оказывает влияние эффект Холла. Известно, что в результате возникающей нелинейности может возникать дополнительная диссипация магнитной энергии, вызванная усилением эффективного переноса ее к диссипативным масштабам. Однако остается много вопросов, касающихся механизмов спектрального распределения, взаимодействия и устойчивости компонент магнитного поля. Решение этих задач имеет большой интерес для астрофизики, где в ряде объектов (нейтронные звезды, белые карлики, пульсары) магнитные поля могут достигать величин порядка 10^{12} Гс. Прямое численное решение уравнения индукции магнитного поля сопряжено в этом случае с огромными вычислительными трудностями (нелинейность, трехмерность). В данной работе для исследования влияния эффекта Холла на эволюцию магнитного поля применён аппарат каскадных моделей.

Каскадные модели представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Они хорошо себя зарекомендовали при описании турбулентных явлений в МГД системах. Поскольку эффект Холла не нарушает законов сохранения магнитной энергии и магнитной спиральности, его удается включить естественным образом в каскадные уравнения для магнитного поля. Численные расчеты полученных каскадных уравнений без учета влияния движения среды показали, что каскад энергии возникает при начальном затравочном крупномасштабном поле и существенно ускоряет процесс диссипации энергии. Однако каскадный процесс носит переходный характер и вырождается даже при существовании подкачки энергии на интегральном масштабе. Стационарный поток энергии от крупных масштабов к мелким реализуется только при периодическом возбуждении. Отдельно исследовалось поведение полоидальной и тороидальной составляющих магнитного поля, связанных, благодаря эффекту Холла. Получено, что поведение полоидальной и тороидальной составляющих магнитного поля носит осцилляционный характер. Полоидальное поле может генерироваться из начального тороидального и наоборот. Показано, что эффект Холла останавливает каскад магнитной энергии и при рассмотрении полной системы МГД уравнений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № PE-009-0).

Высокоскоростное движение пластины в рамках самосогласованного нелокально - гидродинамического подхода

И.А. Никулин, Т.А. Хантулева (С.Петербург)

Для описания высокоскоростных процессов в реальных средах классическая механика сплошной среды оказывается непригодной, поскольку при сильных пространственных неоднородностях гидродинамических полей начинают проявляться эффекты внутренней структуры среды, а также коллективные эффекты взаимодействия, инициирующие в среде процессы самоорганизации на промежуточных масштабных уровнях между микро- и макроскопическими.

На основе современных результатов неравновесной статистической механики и теории нелинейных операторных систем, используемой при решении резонансных задач механики, был разработан новый самосогласованный нелокально - гидродинамический подход к описанию высокоскоростных процессов переноса импульса и энергии [1]. Интегро - дифференциальная система уравнений баланса для плотностей массы, импульса и энергии, включающая вклад крупномасштабных флуктуаций, сводится к системе нелинейных операторных уравнений с ветвящимися решениями. Полученные из граничных и интегральных условий нелинейные функциональные соотношения, замыкающие эту систему, определяют временную эволюцию спектра характерных масштабов внутренней структуры среды. Дискретный для неравновесного процесса спектр масштабов структуры в предельных случаях завершенной или замороженной релаксации внутренней структуры среды становится непрерывным и указывает границы области действия механики сплошной среды. Эти соотношения позволяют определить пороговые значения внешних параметров, при которых происходят структурные переходы в среде.

В рамках нового подхода сформулирована задача о нестационарном высокоскоростном движении плоской пластины в жидкости. На начальной стадии процесса выделяется новый динамический режим движения, который возникает еще до образования турбулентности и характеризуется наличием очень тонкого пристеночного слоя, в котором происходит обратимый процесс обмена импульса и энергии между макро- и мезоскопическими степенями свободы, возбуждение которых сопровождается генерацией крупномасштабных флуктуаций в среде [2]. В одномерной постановке проведено параметрическое исследование поведения нелокальных корреляций в среде, флуктуаций скорости и трения на пластине.

1. T.A.Khantuleva. The nonlocal approach of energy exchange in the shock compressed matter, in monograph “High-pressure compression of solids VI: old paradigms and new challenges”(Y.Horie, L.Daison, N.N.Thadhani, Eds.), Springer, Berlin, 2002, pp 121-161

2. Хантулева Т. А. Динамика движения плоской пластины в среде с учетом структурообразования. Известия ВУЗов «Физика», 2001, 5. сс 71-76.

Эволюционные определяющие соотношения для вязкоупругого слабосжимаемого твердого тела с дискретным спектром времен релаксации

Р.С. Новокшанов, А.А. Роговой (Пермь)

В рамках формализованного подхода к построению определяющих соотношений для сложных сред при конечных деформациях, основанного на применении кинематики наложения малых деформаций на конечные, построена модель вязкоупругого слабосжимаемого твердого тела с дискретным спектром времен релаксации. Структурно - механическим аналогом модели служит параллельное соединение четырех вязкоупругих и одной упругой ветвей. В каждой из ветвей модели процесс конечного вязкоупругого деформирования трактуется в рамках наложения малых вязкоупругих деформаций на конечные вязкоупругие. Определяя напряжение всей модели суммой напряжений в ветвях, учитывая равенство градиентов полных конечных деформаций, для всех ветвей получено эволюционное уравнение состояния для всей модели. Полученное соотношение удовлетворяет термодинамическому неравенству Клаузиуса – Дюгема. Применение формализованного подхода позволило корректно учесть тип объективной производной, входящей в итоговое эволюционное уравнение. Упругое поведение определялось законом для слабосжимаемого упругого материала. Особенность учёта слабой сжимаемости заключается в том, что сжимаемость (несжимаемость) материала определяется не кинематической зависимостью – отличием третьего инварианта меры деформации от единицы, а обобщённым модулем упругости, по величине которого можно судить о степени сжимаемости материала. Поэтому подход применим и при построении определяющих уравнений для слабосжимаемых сред, для которых метод множителей Лагранжа неосуществим.

Модель вязкоупругого тела была идентифицирована по результатам серии экспериментов на одноосное растяжение - релаксацию методом сканирования (метод непосредственного просчёта). Показано хорошее согласование модели и экспериментов на ползучесть с пошаговым нагружением.

Работа поддержана РФФИ (грант № 01-01-96494) и Американским фондом гражданских исследований и развития (грант № RE-009-0).

Численное моделирование и исследование воздействия невесомости на работу кровеносной системы

К.Г. Номоконова (Новосибирск)

Одним из важных факторов для длительных полётов космонавтов (полёт на Марс – 2…3 года) служит действие невесомости. Вместе с тем экспериментальные исследования такой продолжительности затруднены. Целью работы было исследование влияния на работу кровеносной системы человека условий пониженной гравитации и невесомости.

В работе содержатся результаты исследования данного вопроса по двум направлениям. Во-первых, собран материал и выполнен анализ экспериментальных данных в области космической биологии и медицины о физиологических особенностях воздействия невесомости на человеческий организм. Во-вторых, выполнено численное моделирование и исследование распределения крови в организме человека при воздействии на него пониженной гравитации.

В результате анализа литературы выявлены основные механизмы воздействия невесомости на организм человека: снятие гидростатического давления; изменение афферентации; снятие весовой нагрузки на костно - мышечный аппарат. Установлено, что наибольшие физиологические отклонения зафиксированы в кровеносной (перераспределение крови к голове), опорно - двигательной (гиподинамия и гипокинезия) и нервной (сенсорные реакции и иллюзии, изменение пространственного анализа) системах организма.

Исходная математическая модель расчета описывает расходно - напорные характеристики эквивалентной гидравлической системы большого круга кровообращения и представляет собой систему уравнений Бернулли, составленную для пяти характерных групп потребителей: 1 - голова, 2 - руки, 3 - миокард, 4 - мышцы туловища и внутренние органы, 5 - мышцы ног, позволяющую определять минутный объем крови по всем тканям организма.

В процессе численного исследования был выполнен расчёт и анализ данных об особенностях работы кровеносной системы для условий Земли, пониженной гравитации (Марса, Луны) и состояния невесомости. При этом определялось распределение крови на различные ткани организма в пределах действия линейных ускорений в диапазоне $a = 0 \ldots + 1$ g. Установлено, что, в основном, влияние пониженной гравитации и невесомости сказывается на увеличение кровоснабжения мозга (до 9 % на Марсе, 12 … 15 % на Луне и до 20 % в состоянии невесомости) при одновременном пропорциональном ослаблении кровоснабжения туловища и ног. Результаты расчетов качественно и количественно согласуются с известными физиологическими данными. Материалы работы могут быть использованы при изучении гемодинамики в случаях, близких к условиям пониженной гравитации (лежачие больные, нахождение в воде, гиподинамии).

Распространение упругой волны в упругом полупространстве, составленном из двух четвертьпространств с различными упругими свойствами

С.Е. Носов (Москва)

Рассматривается задача о воздействии бесконечного гладкого жесткого штампа на упругое полупространство, состоящее из двух частей, разделенных полуплоскостью, перпендикулярной границе. Жесткий штамп вдавливается с постоянной скоростью. Упругие свойства четвертьпространств считаются различными. Задача решается методом продолжения решения на полное пространство. Далее используется техника интегральных преобразований. Обращение осуществляется методом Каньяра-де Хупа [1].

Анализ решения указывает на наличие особенности напряжений в точке, распространяющейся со скоростью волн Релея вдоль границы сопряжения четвертьпространств. Характер особенности подобен поведению решения задачи Лэмба в релеевской точке [2, 3]. Характерно, для картины волновых фронтов является отсутствие головных поперечных волн, прилегающих к границе полупространства. Решение здесь не обладает никакими особенностями. На фронтах волн напряжения терпят разрыв.

1. Петрашень Г.И., Молотков Л.А., Крауклис П.В. Волны в слоисто-однородных изотропных упругих средах. Л.: Наука. 1985. 302 с.

2. Исраилов М.Ш. Динамическая теория упругости и дифракция волн. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1992. 204 с.

3. Поручиков В.Б. Методы динамической теории упругости. М.: Наука. 1986. 328 с.

Аналитические решения некоторых контактных задач для струн, балок и пластин

Ю.И. Няшин, М.А. Осипенко (Пермь)

Рассматриваются задачи о контакте системы струн, системы балок, балки или пластины с абсолютно твердым телом. Дана точная постановка каждой контактной задачи. В качестве искомой функции выбрано распределение контактного давления. Затем выбирается достаточно богатое множество функций, в котором должна содержаться искомая. Условия, которым должна удовлетворять искомая функция, завершают постановку задачи; эти условия формулируются в виде интегральных неравенств. Доказаны теоремы, утверждающие, что решения поставленных задач единственны. Далее строятся аналитические решения этих задач в различных частных случаях. С математической точки зрения, основной метод, примененный в работе, состоит в исследовании некоторых специальных свойств функций Грина в задачах о деформации струны, балки или пластины. Построенная теория находит приложения в расчете, моделировании и оптимизации конструкции многолистовых рессор, применяемых в автомобилестроении и биомеханике (в качестве упругих элементов некоторых разновидностей протеза стопы).

Оптимальное управление в некоторых задачах фильтрации двухфазной жидкости

А.А. Олейник, Е.В. Шкляева (Пермь)

Рассматриваются некоторые задачи оптимального управления для систем, описывающих фильтрацию двухфазных жидкостей. Такие системы описываются краевыми задачами для систем дифференциальных уравнений в частных производных, содержащих вырождающееся уравнение (на решениях системы происходит вырождения типа уравнения), и потому вопросы их оптимизации являются достаточно сложными.

К задачам оптимального управления сводится задача удержания состояния системы около заданного положения в течение некоторого времени. Рассматривается модельная задача управления фильтрацией двухфазной несжимаемой жидкости в неодносвязной области, граница которой проницаема. В некоторых местах расположены нагнетательные и эксплуатационные скважины. В области происходит процесс вытеснения одной фазы (нефти) другой (водой). Требуется, управляя расходами одной из фаз на нагнетательных скважинах, в течение некоторого времени удерживать систему в состоянии, при котором взаимное распределение фаз близко к заданному профилю при минимальной стоимости управления. Предполагается, что течение жидкостей подчиняется законам Дарси, жидкости являются несмешивающимися и несжимаемыми.

В работе предлагается сведение поставленной задачи к задаче оптимального управления системой с распределенными параметрами с граничным управлением и наблюдением. Рассматриваемая система является сингулярной, поскольку наблюдение неоднозначно зависит от управляющих параметров.

В работе доказано существование оптимального управления, получены необходимые условия оптимальности. Введением сопряженного состояния получена оптимизационная система, которая является необходимым условием оптимальности управления и используется для численного решения задачи.

Подобная задача, рассматриваемая в другой математической постановке, сводится к задаче оптимального управления системой с распределенными параметрами с сосредоточенным управлением и наблюдением. Кроме этого, рассматривается задача определения начального состояния системы по наблюдениям в фиксированные моменты или в течение некоторого времени: зная расходы каждой фазы и насыщенность жидкости ими на скважинах в некоторые моменты времени, требуется определить начальное распределение водонасыщенности в области, которое необходимо знать для исследования задач, описывающих процесс фильтрации двухфазных жидкостей. Задача сводится к задаче стартового управления с финальным наблюдением.

Синергетика пластической деформации

А.И. Олемской (Сумы, Украина)

Исследован процесс развитой пластической деформации, при котором плотность дефектов настолько велика, что становятся существенными коллективные эффекты. На основе понятия о перестраиваемом потенциальном рельефе изложена полевая теория сверхпластического состояния типа полосы Людерса. Показано, что при напряжениях, превосходящих критический предел, дислокационно - вакансионный ансамбль переходит в автокаталитический режим размножения. Исследован процесс взаимных превращений дислокаций и ориентационных границ, при котором пластическая деформация может проявлять периодический характер. Рассмотрены условия появления волн пластической деформации. В рамках фрактальных представлений изложена картина образования и эволюции иерархических дефектных структур, возникающих в процессе ползучести твердого тела. Проведено обобщение на произвольный режим деформирования.

Вероятностные модели прочности и разрушения дискретных систем

Д.А. Онищенко (Москва)

Рассматриваются некоторые аспекты построения и исследования вероятностных моделей дискретных систем в механике прочности и разрушения. В лекции обсуждаются, в основном, модели с дискретным временем, при этом демонстрируется различие в постановке задачи в сравнении со случаем непрерывного времени. Основной задачей является нахождение вероятности разрушения (отказа) многоэлементной системы (МС) при заданном воздействии, когда значения прочности элементов являются случайными величинами. Принимается во внимание эффект перераспределения усилий в работоспособных элементах при частичных отказах, что принципиально отличает рассматриваемые модели от задач математической теории надежности систем с независимыми отказами.

Алгоритм анализа процесса разрушения в МС с дискретным временем выглядит следующим образом: а) при заданном воздействии определяются усилия в элементах МС в исходном (неповрежденном) состоянии; б) если есть перегруженные элементы – усилие в элементе больше прочности – они считаются разрушенными и удаляются; в) производится перерасчет МС в новой (поврежденной) конфигурации; далее переход к шагу б) и т.д. Говорим, что система разрушена, если на каком-то шаге она попадает в недопустимое состояние, и неразрушена, если она окажется в допустимом неперегруженном состоянии. Таким образом, в рамках рассматриваемой модели вероятность разрушения МС вычисляется как вероятность реализации пути разрушения, приводящего в недопустимое состояние.

Выделяется класс систем без разгрузки: это такие МС, в которых усилия в элементах не могут уменьшаться на любом пути разрушения; исследуются свойства таких систем. Показано, что для МС без разгрузки может быть выполнено полное аналитическое исследование задачи. Далее объясняется метод, основанный на вычислении набора "мажорирующих усилий", позволяющий находить эффективную верхнюю оценку вероятности разрушения для систем общего вида (в которых может иметь место разгрузка).

В заключение описывается модель пучка волокон – это система статистически одинаковых элементов (волокон) с некоторой диаграммой деформирования, определяемой набором случайных параметров. В этой модели нагрузка распределяется равномерно между всеми работоспособными в текущем состоянии элементами. Демонстрируется, как применение аналитического аппарата теории вероятностей позволяет осуществить асимптотический анализ прочности таких систем при большом количестве элементов. Приводятся примеры приложений модели к задачам с различным физическим содержанием.

Метод фрактальных карт механизма адаптации структуры деформируемых твердых сред к внешним воздействиям в экстремальных технологиях

А.А. Оксогоев (Улан-Удэ)

Основой самоуправления экстремальных технологий является теория самоорганизованной критичности, из которой следует, что нелинейные открытые системы в точках неустойчивости (бифуркаций) в локализованной области сопряжены с динамическими явлениями переходов при реализации механизма закона обратной связи: устойчивость (термодинамическая самоорганизация (ТС)) – неустойчивость (динамическая самоорганизация (ДС)) – устойчивость (ТС)). В точках бифуркаций генерируется универсальная информация о свойствах среды, характеризующая структурные перестройки. Знание о механизме перестройки необходимо для тестирования критических параметров процесса в режиме с обострением по известным границам одной из стадий термодинамической самоорганизации и создания перспектив по прогнозированию и управлению технологической наследственностью деформируемых материалов. При этом ключевым параметром, составляющим предмет тестирования, является информация о мультифрактальных образованиях структур на различных масштабных уровнях как результат адаптации структуры (межзеренных границ) деформируемых тел к внешнему воздействию. С учетом типа перестройки структуры материала разработаны фрактальные карты механизма адаптации структур к внешним воздействиям в виде зависимости $D_{q_*} \square \Delta q_*$ или $F_{q_*} \square |\Delta q_*|$ соответственно для периодических и квазипериодических систем, где D_{q_*} - критерий вырождения, F_{q_1} - порог хаотичности (однородности), $\Delta q_* = D_1 - D_{q_*}$ - показатель предела нарушенной симметрии, D_1 - критерий зарождения, q – момент порядка мультифрактального множества. На фрактальной карте выделены не только границы перехода от одного типа перестройки структур к другому, но и определены области механизмов адаптации: упругая адаптация, квазиупругая деформация, упруго - пластическая деформация, перколяция и рекристаллизация. Определены области перехода при структурных перестройках от зарождения к деградации (повреждаемости) материалов. Метод построения карты с выделением областей механизма адаптации структуры при внешних воздействиях, в частности, при скоростном изолированном соударении и виброупрочнении энергонесущим телом (потоком дробей) из стали поверхностного слоя Al-сплава при варьировании условий упрочнения от 200 до – 150^{0}С, позволил установить точки бифуркаций, вблизи которых процессы перестройки структуры являются самоуправляемыми, т.е. контролируемыми минимумом производства энтропии, отвечающими оптимальности структурного состояния поверхностного слоя материала.

Модели элементарных ячеек для расчета давления при неравновесном объемном энерговыделении в гетерогенном материале с дисперсным наполнителем и пористым связующим

А.В. Острик, Е.А. Ромадинова (Черноголовка)

Предлагаются модели элементарных ячеек для расчета давления при неравновесном объемном выделении энергии в гетерогенном материале (ГМ) с дисперсным наполнителем и пористым связующим. Рассматриваются варианты квазистатического и динамического установления давления в ГМ.

В том случае, когда характерные времена акустической релаксации каждой из компонентов ГМ много меньше времени энерговыделения, процесс выравнивания давления в ячейке можно считать квазистатическим и волновым движением пренебречь. В квазистатическом случае поведение пористого связующего может быть описано зависимостью пористости от давления. Поскольку процесс схлопывания пор происходит при невысоких уровнях давления и до начала фазовых переходов, то при построении этой зависимости используются соотношения теории упругости для элементарной ячейки пористого материала, состоящей из сферической поры и окружающего ее сплошного связующего.

Для крупных частиц наполнителя ГМ и малых длительностей подвода энергии давление в ячейке не успевает выравниваться, что приводит к интенсивным волновым процессам. Распространяющиеся по ячейке волны перераспределяют энергию между компонентами ГМ, и в результате после их затухания давление в ячейке может существенно отличаться от полученного в квазистатическом приближении. Для описания процесса динамического схлопывания пор связующего используется релаксационная модель необратимого изменения объема пористого материала. В этой модели обратимое изменение объема связывается только с деформированием сплошного материала, а необратимое – с изменением объема пор. Упругие изменения объема пор и пластические деформации объема сплошного материала не учитываются, поскольку в большинстве случаев первые из них малы по сравнению с необратимым изменением объема при схлопывании пор, а вторые – по сравнению с упругими деформациями объема сплошного материала.

Приводятся результаты расчетов для гетерогенного материала, состоящего из эпоксидного связующего и наполнителя из диоксида олова. Проводится сравнение данных, полученных по динамической модели, с результатами, следующими из модели квазистатического установления давления.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант № 02-01-00743).

Роль мультипликативного разложения градиента места в механике деформируемого твердого тела

В.А. Пальмов (Санкт - Петербург)

Мультипликативное разложение градиента места Ли широко используется в теории конечных деформаций упруго - пластического материала. Логическим основанием для его введения является представление о существовании трех состояний упруго - пластического тела: начального (или отсчетного), актуального и, так называемого, промежуточного (или разгруженного). Предполагается, что переход из начального состояния в промежуточное является чисто пластическим, а из промежуточного в актуальное - чисто упругим. В докладе доказывается, что предположение о существовании чисто пластического разгруженного состояния тела является ошибочным. А это лишает исключительности мультипликативное разложение градиента перемещений: наряду с ним допустимы и другие разложения.

Далее, мультипликативное разложение градиента места подсказывает вполне определенное термодинамически состоятельное определяющее уравнение для чисто пластической деформации. В докладе доказывается, что это же самое определяющее уравнение чистой пластичности может быть с успехом использовано и при любых других разложениях полной деформации на упругую и пластическую составляющие. При этом оказывается, что упругая составляющая определена однозначно, пластическая же зависит от принятого закона разложения.

Полная однозначность достигается, если в определяющем уравнении упруго - пластического материала учитывается кинематическое упрочнение, зависящее от пластической деформации. Второй закон термодинамики в этом случае ограничивает число возможных разложений только одним аддитивным разложением тензора скоростей деформаций. Мультипликативное разложение градиента перемещений оказывается термодинамически несостоятельным.

Краевые задачи пьезомеханики структурно - неоднородных сред

А.А. Паньков, Ю.В.Соколкин (Пермь)

Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы благодаря своим уникальным физико - механическим свойствам находят широкое применение в различных областях науки и техники, в основном, в акустике, вычислительной технике, радиоэлектронике и управляющих системах. Одним из новых классов пьезоэлектриков и пьезомагнетиков являются пьезокомпозиты с пьезоактивными элементами структуры. Взаимодействие пьезоэлементов на структурном уровне обуславливает на макроуровне композита качественно новые эффекты по сравнению с однородными пьезоматериалами.

Научной базой для расчета композитных пьезоэлементов является теория электромагнитоупругости структурно - неоднородных сред, одна из центральных задач которой - построение адекватных математических моделей и разработка методов решения связанных краевых задач электро- и магнитоупругости композитов. Нерегулярный характер реальных пьезоструктур требует решения этой задачи в вероятностной постановке.

Представлено новое решение стохастической связанной краевой задачи электроупругости для пьезоактивных композитов со случайными квазипериодическими структурами методом периодических составляющих. Решение представлено в виде ряда, на основе которого были рассмотрены различные приближения: первое или корреляционное приближение, сингулярное и обобщенное сингулярное приближения для полей отклонений искомых решений: потенциала, напряженности и индукции электрического поля и полей деформирования от соответствующих решений для композита с идеальной периодической структурой. Получены новые аналитические решения для тензоров эффективных упругих, пьезомеханических и диэлектрических проницаемостей квазипериодических композитов в виде выражений через известное решение для идеальной периодической структуры, нового решения для среды типа статистическая смесь и новые структурные параметры квазипериодической структуры: тензоры анизотропии разупорядочивания и коэффициент периодичности.

Представлены результаты численных расчетов: решены тестовые задачи для слоистых и однонаправленных волокнистых пьезокомпозитов и проведено исследование совместного влияния разупорядоченности, геометрии и величины относительного объемного содержания эллипсоидальных пор и включений на эффективные пьезомеханические свойства, на значения инвариантов напряжений в каркасах пористых пьезокерамик и на гистерезисные кривые намагниченности магнитокерамик, выявлены новые эффекты.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96403).

Математический анализ гистологических препаратов применительно к ранней диагностике рака молочной железы

И.А. Патрикеев, Р.А. Юрлов (Пермь)

Цель работы Определение рака молочной железы на ранней стадии его развития, а также назначение лечения – сложная комплексная проблема, несомненно, актуальная в настоящее время. Цель работы - получить критерий, по которому можно будет количественно оценить степень злокачественности и помочь диагносту разрешить различные спорные вопросы, а также автоматизировать процесс предварительной постановки диагноза на основе результатов биопсии пораженных заболеванием тканей.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи был проведен сбор и обработка статистических данных о ядрах клеток на гистологических препаратах из узла опухоли различной локализации и из фона (непораженной ткани). Препараты были предоставлены Пермской медицинской академией. С помощью оптического микроскопа и видеокамеры изображение вводилось в компьютер. Общее число изображений – 71. Обработка изображения заключалась в предварительной фильтрации, выделении ядер и подсчете морфологических параметров, таких как: площадь, периметр, скругление, растяжение, концентрация/ плотность, центр тяжести и другие (общее число параметров - 19), а также средних значений этих величин и средних отклонений. Причем, это делалось как для изображений, полученных из узла опухоли, так и для фона (на расстоянии 3 см от центра опухоли).

Результаты. Результаты анализа представлялись в виде гистограмм. Сравнивая полученные гистограммы, можно количественно оценить степень полиморфизма ядер клеток и связать данный критерий с оценкой злокачественности опухоли.

Данная работа поддержана РФФИ (грант № 01-01-96493) и Американским фондом гражданских исследований и развития (грант № РЕ-009-0).

Численное моделирование цилиндрического опыта Мешкова по модели турбулентного перемешивания с одним уравнением

А.В. Певницкий, А.Н. Разин, В.К. Фадеев (Саров)

Предложена упрощенная модель турбулентного перемешивания. Проведено численное моделирование турбулентного перемешивания, возникающего на контактной границе гелий - воздух в цилиндрическом опыте Мешкова. На серии расчетов показан характер зависимости численного решения уравнений предлагаемой модели ТП от времени начала учета ТП, начального значения турбулентной вязкости и ширины начальной зоны ТП. Рассмотрены особенности взаимодействия зоны турбулентного перемешивания с ударными волнами и некоторые вопросы сходимости разностного решения уравнений турбулентного перемешивания. Приводятся R-t диаграммы границ зон турбулентного перемешивания, профили давления и градиентов давления.

1. Андронов В.А., Козлов В.И., Никифоров В.В., Разин А.Н., Юдин Ю.А. Методика расчета турбулентного перемешивания в одномерных течениях (методика ВИХРЬ). // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1994г., вып. 2, с. 59-64.

2. В.В. Никифоров. Турбулентное перемешивание на контактной границе разноплотных сред // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1985г. Вып. 1. С. 3-8.

3. Разин А.Н. Алгоритм определения положения центра конечно-разностной ударной волны. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. 2001г., вып. 1, с. 43-50 .

4. Андронов В.А., Бахрах С.М., Мешков Е.Е., Никифоров В.В., Певницкий А.В., Толшмяков А.И. Экспериментальное исследование и численное моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях. Докл. АН СССР, 1982, т. 264, № 1, с. 76-82.

5. Е.Е. Мешков. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 5. С.151-158.

Удельная теплоемкость образцов поли-е-капроамида, полученных гидроэкструзией в твердой фазе при различных режимах

Б.Г. Петров, Е.В. Славнов, В.М. Тимофеев (Пермь)

Определение динамических свойств модельного и исследуемого материалов, их обработка в соответствии с предложенным ранее алгоритмом позволила оценить и количественно описать ориентацию, наведенную в процессе формования в образцах, полученных гидроэкструзией в твердой фазе. На примере гидроэкструдатов поли-е-капроамида установлено, что зависимость параметра порядка ориентации макроструктуры с изменением коэффициента экструзии в определенном диапазоне имеет характер фазового перехода. С целью определения наличия или отсутствия фазового перехода подготовлен и проведен эксперимент по определению удельной теплоемкости гидроэкструдатов поли-е-капроамида в диапазоне температур до 230^0С, полученных при различных коэффициентах экструзии. Использовался метод электротеплового моста. Метод основан на нагревании двух образцов в одинаковых условиях с одинаковой скоростью, один из которых – эталон с известной удельной теплоёмкостью, другой – испытуемый образец. Проведен анализ кривых удельной теплоемкости гидроэкструдатов поли-е-капроамида от коэффициента экструзии. Отмечен сдвиг пика удельной теплоемкости в области температур $T=74\text{-}76^0$С. Полученные экспериментальные данные показали, что характер изменения удельной теплоемкости образцов зависит от коэффициента экструзии, однако пока преждевременно говорить о том, что с изменением коэффициента экструзии в материале имеет место фазовый переход.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-96485).

Случайные процессы в системах с распределенными параметрами и их анализ

И.Е. Полосков (Пермь)

Случайные явления в распределенных системах (системах с бесконечным числом степеней свободы) длительное время привлекают значительный интерес исследователей. Например, большое число работ посвящено анализу случайных колебаний в упругих стержнях, напряженно - деформируемого состояния и вибраций пластин и оболочек, распространения волн (в том числе сейсмических) в случайно - неоднородных средах, расчету изменения статистических характеристик полей в гидромеханике и др.

При изучении линейных систем указанного выше типа, как правило, ограничиваются методами корреляционного анализа. При анализе же нелинейных объектов одним из наиболее применяемых подходов является трактовка движений таких систем, как векторных марковских процессов. Но для использования теории таких процессов требуется предварительная дискретизация задачи (обычно используются различные конечно - разностные схемы, методы Галеркина с разложением по формам свободных упругих колебаний и Фурье) и редукция к конечному числу степеней свободы [1]. Другим инструментом решения подобных задач является использование характеристических функционалов для случайных полей.

В докладе рассматривается возможность применения теории марковских случайных процессов на промежуточном этапе вывода уравнений в частных производных для первых моментов случайных характеристик нелинейных распределенных систем без использования понятия характеристического функционала в предположении, что флуктуационные случайные поля принадлежат к гауссовскому типу [2]. Приводятся примеры вывода таких уравнений, алгоритмы, основанные на применении пакетов Mathematica [3] и Maple [4] на этапе подготовки численных расчетов, и результаты анализа случайных полей, описываемых уравнениями Бюргерса, Гинзбурга-Ландау, и модели переноса загрязнений водами рек.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-01-96-406 и № 02-01-96-409).

1. Гончаренко В.М. О случайных колебаниях упругих тел и теория марковских процессов // ПМ. 1991. Т.27. N 8. С.95-100.

2. Poloskov I.E. Random regimes in nonlinear systems and computer algebra // IUTAM Symposium on Nonlinear Stochastic Dynamics / Program and abstracts. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002. 2 p.

3. Wolfram S. The Mathematica Book. 3rd ed. Cambridge: University Press, 1996. 1403 p.

4. Heck A. Introduction to Maple. - Berlin: Springer-Verlag, 1993. 500 p.

Крупномасштабные течения в турбулентном конвективном слое с подвижным теплоизолятором

Е.Н. Попова, П.Г. Фрик (Пермь)

Астрофизические и геофизические течения имеют, как правило, конвективную природу, а характерные размеры природных систем таковы, что безразмерные параметры (числа Рейнольдса или Релея) имеют огромные значения, и потоки турбулентны. Само понятие – турбулентность - ассоциируется с хаосом, разрушением изначально упорядоченных потоков и передачей энергии регулярных крупномасштабных течений в пульсации малых масштабов, обеспечивающих эффективную диссипацию кинетической энергии. Возникают, однако, и ситуации, когда энергия неупорядоченных мелкомасштабных движений под действием каких-либо физических механизмов преобразуется в энергию упорядоченных крупномасштабных движений. В конвективных течениях этот процесс может быть связан с тем или иным способом влияния на конвективные потоки тепла. В данной работе рассмотрена задача о возникновении макротечений на фоне развитой турбулентной конвекции в случае, когда воздействие на тепловой поток происходит за счет снижения эффективности вертикальных конвективных движений плавающим в потоке телом. Экспериментально исследованы течения в подогреваемом снизу слое жидкости, ограниченном медными горизонтальными теплообменниками. В качестве подвижного изолирующего тепло объекта использован диск из плексигласа толщиной 1 мм, глубину погружения которого можно контролировать. Показано, что в зависимости от числа Релея и расстояния от диска до горизонтальной поверхности в слое возникают либо регулярные колебания, либо колебания с выраженной временной перемежаемостью, либо хаотические колебания. Исследование фурье- и вейвлет-спектров колебаний положения центра диска позволило определить тип и найти частоту колебаний и построить карту режимов, которая наглядно иллюстрирует зависимость возникновения того или иного типа движений от безразмерных параметров системы. Получена экспериментальная зависимость частоты колебаний теплоизолятора от числа Релея и положения объекта в слое жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-01-96482).

Методы идентификации параметров композиционных и биоматериалов

Н.В. Поспелова (Москва)

В работе рассмотрены методы решения обратных задач (задач идентификации), возникающих при обработке информации в ультразвуковых и лазерных приборах биомедицинской диагностики. Под диагностикой понимается определение параметров внутренней структуры биообъекта, технического изделия или природного образования по результатам измерения доступных наблюдению параметров. Для решения задач идентификации используются, как правило, итерационные методы. Каждая итерация содержит этап решения прямой задачи, которая обычно представляет собой краевую или начально - краевую задачу для уравнений или систем уравнений в частных производных, описывающих взаимодействие внешних полей или тел с диагностируемым объектом.

В работе рассмотрено два класса задач диагностики – ультразвуковые методы и методы с использованием лазерного излучения. Применительно к проблеме ультразвуковой диагностики прямую задачу определяют уравнения, описывающие распространение волн в деформируемых средах – жидкостях, газах или твердых деформируемых телах. Для постановки и решения обратной задачи было проведено предварительное преобразование уравнений прямой задачи по методу геометрической оптики. Обратная задача была поставлена как задача минимизации функции (функционала), определяющего рассогласование экспериментально определяемых и теоретически вычисляемых времен движения сигнала от излучателя к приемнику (детектору). Для ее решения использован метод Гаусса-Ньютона (квазиньютоновский метод). Был проведен анализ численных решений с целью выявления чувствительности измеряемых величин от изменения идентифицируемых параметров для разных схем проведения эксперимента.

Одним из эффективных направлений биомедицинской диагностики является применение оптических методов исследования. Уравнения, определяющие взаимодействие световых фотонов с неоднородным материалом, в том числе биотканью, строятся либо на основании уравнений Максвелла, или по методу Монте-Карло, либо с использованием уравнения переноса. В работе был выбран третий подход, в сочетании с диффузионной аппроксимацией уравнения переноса излучения. Обратная задача была поставлена и решена как задача минимизации функции, определяющей рассогласование экспериментально определяемых и теоретически вычисляемых распределений интенсивности отраженного светового потока. Минимизация производилась по оптическим характеристикам среды. Решение задач для слоистых сред показало работоспособность и эффективность предлагаемого метода.

Моделирование остановки фронта жидкого углеводородного загрязнителя в почве

К. А. Поташев (Казань)

Предлагаются две математические модели задержки фронта несмешивающейся с водой жидкости (НВЖ) – загрязнителя – в сильно увлажненной почве. Этот факт был выявлен экспериментально [1] и до настоящего времени не находил научного объяснения в рамках традиционных моделей фильтрации [2]. Рассматриваемый эффект чрезвычайно важен с точки зрения охраны подземных грунтовых вод от загрязнения, а именно, оценки защитных свойств почвенного слоя [3]. В связи с этим были исследованы две схемы данного явления. Обе они имеют общие моменты, а именно, подвижной фазой считается только фаза загрязнителя (вода капиллярно связана, и ее количество в почвенном слое неизменно), фильтрация НВЖ подчиняется закону Дарси.

Далее, в первой схеме предполагается, что при взаимодействии НВЖ с органическим компонентом почвы происходит набухание пористой матрицы, а, следовательно, уменьшение размера пор и увеличение водонасыщенности S. При некотором критическом значении S^*, близком к единице, фазовая проницаемость НВЖ становится равной нулю, и ее движение прекращается. Задача решается методом характеристик.

Во втором случае замедление и последующая остановка фронта загрязнителя также объясняется механизмами взаимодействия НВЖ с органической составляющей стенок пористой матрицы, но проявляющихся не в набухании, а в постепенном загущении проникающего в грунт загрязнителя. При этом пористость остается постоянной, и над фронтом НВЖ, вследствие загущения, выполняется условие полного двухфазного насыщения пористой среды водой и жидким загрязнителем. Определение траектории ЛНВЖ сводится к решению интегрального уравнения Вольтерра.

По обеим схемам поставлены и решены модельные задачи. Результаты расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-04-48540).

1. Костерин А.В., Бреус И.П., Неклюдов С.А., Бреус В.А. Защита грунтовых вод от углеводородного загрязнения путем усиления барьерных функций почвы // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже 3-го тысячелетия: Материалы Всеросс. науч. конф. Томск: Изд-во НТЛ, 2000. С. 240-243.

2. Баренблатт Г.И. , Ентов В.М. , Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.

3. Современные проблемы гидрогеологии и гидромеханики. Сборник докладов конференции. – СПб., 2002. – 572 с.

Математическое моделирование конвекции в электрохимических системах

А.А Приходько, В.И Елисеев, Н.В Кузнецова (Днепропетровск)

Электрохимические системы представляют собой многокомпонентную среду, в которой происходят объемные и гетерогенные химические реакции, вызывающие гидродинамическое движение в аппаратах, которое, в свою очередь, влияет на распределение компонентов. Основные проблемы рассмотрения массообмена электролитических жидкостей заключаются в адекватном моделировании процессов, проходящих в окрестности электродов, где формируются диффузионные, тепловые и гидродинамические потоки. Необходимо учитывать, что в растворах электролитов наряду с диффузионным существует и миграционный поток ионов, пропорциональный напряженности электрического поля. Временные масштабы электрических и массообменных процессов существенно отличаются друг от друга. Результаты математического моделирования сложной картины взаимодействия концентрационных, гидродинамических и электрических полей во многом зависят от точности воспроизведения всех временных и дискретных особенностей электрохимических систем. В докладе обсуждаются проблемы построения математической модели, разработки алгоритмов и расчета конвекции в электрохимических системах.

Развитие МГД-неустойчивости в канале кольцевого сечения

А.В. Проскурин (Барнаул)

Несмотря на быстрый рост мощности вычислительных машин, и, соответственно, развитие методов прямого численного моделирования (DNS), проблема исследования ламинарно - турбулентного перехода по-прежнему имеет большое практическое значение. Для проектирования большого числа технических устройств требуется знание того режима (ламинарного или турбулентного), который в них будет осуществляться. Во многих случаях можно сделать предположения, пусть и достаточно грубые, которые позволят свести исходную проблему к уравнению типа Орра-Зоммерфельда. К сожалению, линейная теория даёт только необходимые условия неустойчивости. То есть, может быть так, что бесконечно малые колебания, нарастающие по линейной теории, приведут к появлению некоторого устойчивого вторичного колебательного режима, а не к разрушению стационарного решения.

В докладе представлено исследование устойчивости и некоторых вторичных режимов одного магнитогидродинамического течения.

Моделирование реологических свойств полимерных материалов

О.А. Путилова, А.Л.Свистков (Пермь)

В данной работе используется метод построения математических моделей для описания реологического поведения материалов, работающих в области конечных деформаций. Механическое поведение представим в виде схемы, содержащей упругие и вязкие элементы. Плотность свободной энергии введем как функцию нескольких внутренних переменных, имеющих простой физический смысл кратностей удлинений упругих элементов. В нашей модели будем считать, что все элементы удовлетворяют условию неизменности их объема при деформировании, и для описания их свойств используем уравнения упругих материалов и вязких жидкостей. Сумма тензоров напряжений Коши элементов, присоединяемых слева, равна сумме тензоров напряжений Коши элементов, присоединяемых справа.

Приведем пример использования метода построения математических моделей для моделирования вязкоупругих материалов. Показано влияние особенностей соединения элементов схемы и выбора потенциала свободной энергии на механические свойства.

Рассмотрена задача сдвигового течения расплава полиэтилена между двумя пластинками. Нижняя пластинка неподвижна, а верхняя двигается в горизонтальной плоскости по гармоническому закону или с постоянной скоростью. Для построения математической модели используется схема, состоящая из параллельно соединенных максвелловского и вязкого элементов. В модели используется дополнительный спин, уточняющий вращательные свойства упругого элемента. Показано удовлетворительное совпадение с экспериментами по гармоническому нагружению расплава полиэтилена.

Исследовано влияние соотношения характерных времен нагружения системы и перестройки системы (полимерных клубков) на вид зависимости сдвигового напряжения от величины смещения верхней пластинки в условиях движения ее с постоянной скоростью.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96404).

Исследование цепочечных агрегатов в магнитных жидкостях

А.Ф. Пшеничников, А.А. Федоренко (Пермь)

Цепочечные агрегаты являются традиционным объектом исследований в аналитических работах по магнитным жидкостям [1-4]. Данный эксперимент был направлен на обнаружение в магнитных жидкостях цепочечных кластеров. Особое внимание уделено изучению поведения образцов в скрещенных магнитных полях, в связи с высокой чувствительностью этого метода к присутствию цепочек в коллоидном растворе [5]. Суть метода заключена в следующем: цилиндрический образец помещен в скрещенные постоянное и переменное магнитные поля. Вокруг кюветы с образцом намотана измерительная катушка. Ось постоянного поля совпадает с осью цилиндра и катушки. В измерительной катушке из-за нелинейности кривой намагниченности возникает ЭДС на удвоенной частоте. Этот сигнал регистрируется селективным вольтметром. Для экспериментов характерна немонотонная зависимость ЭДС сигнала от напряженности постоянного магнитного поля.

Исследованы коллоидные растворы магнетита в декане в широких диапазонах подмагничивающих полей и концентраций магнитной фазы. Обнаружено, что для большинства концентрированных образцов их поведение удовлетворительно описывается теорией, не учитывающей существования цепочек. Возможно, влияние цепочек в эксперименте не обнаруживается в результате эффекта экранировки и образования конкурирующих не цепочечных квазисферических кластеров. Данные эффекты малы в разбавленных растворах, и поведение разбавленных магнитных жидкостей уже плохо описывается без учета цепочек. Наилучшего согласования экспериментальных и расчётных кривых удаётся добиться, если считать цепочки 2-3 звенными. Такие же размеры кластеров были получены и в [6]. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 01-02-17839, 02-03-33003) и Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР) (грант № РЕ-009-0).

1. De Gennes P., Pincus P. A.. // Phys. Kondens Materie, 1970. Bd. 11, N 3. S. 189.

2. Tavares J.M., Telo da Gama M.M., Osipov M.A. // Phys. Rev. E. 1997. Vol 56, P. 6252.

3. Зубарев А.Ю. // ЖЭТФ 2001. Т.120, вып.1. С. 94.

4. Кантарович С.С. // В кн. 10-я международная Плесская конференция по магнитным жидкостям. Сборник научных трудов. Плесс 2002. С. 51.

5. Пшеничников А.Ф., Федоренко А.А., Пирожков Б.И. // Вестн. Перм. ун-та 2002. Вып. 4. Физика. С. 85.

6. Buzmakov V.M., Pshenichnikov A.F. // J. Colloid Interface Sci. 1996, Vol.182. P.63

О численном моделировании фазовых переходов первого рода в системе сферических диполей

А.Ф. Пшеничников, Ю.М. Язев (Пермь)

Известно, что при моделировании фазового перехода первого рода в системе сферических диполей образуется большое количество слабо взаимодействующих кластеров с малой вероятностью взаимного обмена частицами. Время установления термодинамического равновесия, соответствующего двухфазному состоянию, при этом увеличивается настолько, что равновесие становится практически недостижимым. В [1, 2] для того, чтобы избежать больших затрат машинного времени, был реализован процесс «испарения» конденсированной фазы. Движение к термодинамическому равновесию сопровождалось «испарением» капли и формированием «газообразной» фазы. Одновременно изменялась плотность конденсированной фазы и положение ее границ. Этот прием позволил предотвратить разбиение системы на множество подсистем и построить фазовую диаграмму системы при разумных затратах машинного времени. К сожалению, отсутствие надежных аналитических результатов и экспериментальных данных для чисто дипольных систем не позволяет провести оценку погрешности полученных результатов, связанную, в том числе, и с малыми размерами моделируемой системы.

Целью данной работы является апробация описанного выше приема на системе мягких сфер с изотропным потенциалом Леннарда-Джонса. Эти системы изучены более подробно, и требуемая оценка погрешности метода может быть получена, по крайней мере, для критической точки. Полученные нами результаты показали эффективность и работоспособность предложенного метода в целом. Он позволил с минимальными затратами машинного времени смоделировать фазовый переход типа «газ – жидкость», и, как следствие, сделал возможным построение фазовой диаграммы системы. Возможной причиной систематического завышения расчетного потенциала (т.е. занижение температуры фазового перехода) может быть влияние краевых эффектов, обусловленных относительно небольшими размерами моделируемой области. К сожалению, компьютерные ресурсы, имеющиеся в распоряжении, не позволяют проверить эту версию на системах с большим числом частиц. С другой стороны, трудно ожидать очень хорошего совпадения между экспериментальными данными для реальных систем и результатами, полученными на модельном потенциале, независимо от алгоритма расчета. Кроме того, оцениваемая нами погрешность вычисления близка к наблюдаемому расхождению. С этой точки зрения расхождение порядка 10% следует признать непринципиальным, а предложенный алгоритм расчета фазовых диаграмм - вполне подходящим.

1. Пшеничников А.Ф., Мехоношин В.В. // Письма в ЖЭТФ, 2000. Т.72, вып. 4. С. 261.

2. Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V. // Eur. Phys. J. E, 2001. Vol. 6. P. 399.

4-мерный канонический формализм в теории упругости при конечных деформациях

Ю.Н. Радаев (Самара)

Нелинейная теория упругости представлена как физическая теория поля [1] в одном из канонических вариантов. Основой подхода выступает принцип минимальности Гамильтонова действия для упругого поля (в том числе, возможно, сингулярного из-за наличия рассеянного поля микроповреждений) в условиях конечности деформаций.

Исследование обобщенных вариационных симметрий для функционала действия нелинейно - упругого поля в духе [2] с помощью 4-мерного полевого формализма реализуется с целью получения регулярного метода вывода инвариантных интегралов нелинейной механики.

Изложение существенно отличается от характерных для механики сплошных сред и теории упругости способов определения базовых понятий и вывода основных полевых уравнений. Исходя из вариационного принципа минимальности действия для нелинейно - упругого поля, даны канонические и естественные определения всех важнейших тензорных полей, необходимых для его описания. Систематический вывод законов сохранения нелинейной теории упругости и соответствующих им инвариантных интегралов реализован с помощью последовательного проведения принципа двойственности описания деформации, существенно обобщенного в [3].

Важной частью работы является также исследование степени определенности тензорных характеристик нелинейно - упругого поля. Здесь используется концепция Лагранжиана пустого пространства (нулевого Лагранжиана). В рамках 4-мерного полевого формализма найдена его общая форма.

В целом работу следует рассматривать как компактное, но вполне строгое изложение теории упругости при конечных деформациях с позиций классической теории поля. В то же время в ней разработаны и формальные основы нелинейной механики разрушения, в значительной степени базирующейся (в теоретическом плане) на аппарате инвариантных интегралов, которые, по существу, представляют собой инвариантную формулировку основных физических законов сохранения в виде интегралов по контуру или поверхности, не зависящих от пути интегрирования

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. М: Наука, 1973. 504 с.

2. Qlver P. J. Application of Lie Groupes to Differential Equations. New York: Springer, 1986.

3. Maugin G.A. Material Inhomogeneities in Elasticity. London: Chapman & Hall, 1993. 276 pp.

Колебания магнитоупругой сферы во внешнем поле

Ю.Л. Райхер, О.В. Столбов (Пермь)

Название *ферроэласт* обозначает композиционную систему из вязкоупругой полимерной матрицы и наполняющего ее высокодисперсного ферромагнетика. Имея модули упругости ~10^3 Па, ферроэласты (феррогели) рассматриваются как перспективные материалы для искусственных мускулов, микроманипуляторов и т.д. В основе всех этих приложений лежит магнитодеформационный эффект (МДЭ). Он заключается в том, что образец ферроэласта при помещении в магнитное поле деформируется на многие десятки процентов.

В работе теоретически исследованы колебания образца из феррогеля, находящегося во внешнем однородном магнитном поле H_0. Рассмотрение ведется на основе общей системы уравнений магнитостатики и теории упругости при больших деформациях. В полном виде проблема не допускает аналитических решений, поэтому на начальном этапе исследований принят ряд допущений. Предполагается, что образец всегда сохраняет форму эллипсоида.

В таком случае деформация образца может быть охарактеризована кратностью растяжения λ: отношением длины образца после деформации к его начальной длине. Также вводится гипотеза об однородности полей напряжений и деформаций внутри образца. В этих предположениях общая система сводится к одному обыкновенному нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка для переменной $\lambda(t)$.

Изучены колебания эллипсоида из материала, обладающего упругим потенциалом Муни—Ривлина. Эллипсоид совершает колебания относительно своего равновесного размера, который определяется постоянным внешним магнитным полем H_a. Обнаружено, что зависимость собственной частоты Ω_0 от H_a имеет немонотонный характер: при малых полях происходит уменьшение частоты собственных колебаний. Производная $d\Omega_0/dH_a$ в области смягчения мод отрицательна и тем больше по абсолютной величине, чем выше магнитная восприимчивость χ ферроэласта. Вследствие этого при достаточно больших значениях χ частота Ω_0 может обратиться в нуль. Сопоставление со статическими кривыми $\lambda(H_a)$ показывает, что точки обращения в нуль частоты собственных колебаний соответствуют крайним точкам петли гистерезиса МДЭ, возникающего в материале.

Динамика $\lambda(t)$ исследована также путем численного моделирования. Получено решение задачи о свободных колебаниях эллипсоида в постоянном внешнем поле и об установившихся вынужденных колебаниях, индуцированных магнитным полем $H_0(t)=H_a+h(t)$. Рассчитаны кривые динамического гистерезиса МДЭ. Изучена эволюция петель $\lambda(H_0)$ в зависимости от основных материальных параметров системы.

О роли турбулентности в винтовом динамо

К.-Х. Редлер (Потсдам, Германия), Р.А. Степанов (Пермь)

Винтовое динамо Пономаренко [1] является одним из самых простых примеров генерации магнитного поля ламинарным движением проводящей жидкости. В нем несимметричное магнитное поле возникает в осесимметричном закрученном (винтовом) потоке в цилиндрическом канале. Эффект самовозбуждения магнитного поля является пороговым и наблюдается при магнитном числе Рейнольдса $Rm > 10$. Это условие означает, что для жидкостей с малым магнитным числом Прандтля $Pm << 1$ течение будет турбулентным, так как гидродинамическое число Рейнольдса должно быть $Re >> 1$.

Учет турбулентности приводит к появлению дополнительных механизмов, как генерации, так и диссипации магнитного поля в движущейся проводящей жидкости. Следуя теории среднего поля [2], взаимодействие пульсаций поля скорости и магнитного поля приводит к появлению эффективной электродвижущей силы $\mathbf{\mathcal{E}} = \overline{\mathbf{u}' \times \mathbf{b}'}$. В данной работе определяется структура $\mathcal{E}$, возникающей в турбулентном винтовом потоке. На основе корреляционного приближения второго порядка получены соотношения для коэффициентов и их оценки при характерных параметрах динамо эксперимента, планируемого в Перми. Численными методами показан характер влияния турбулентных эффектов на винтовое динамо. Получены как режимы, при которых турбулентный α - эффект согласуется с общим винтовым потоком и тем самым усиливает процесс генерации поля, так и режимы, в которых турбулентность ослабляет винтовое динамо.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-01-96482) и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № РЕ-009-0).

1. Пономаренко Ю.Б. К теории гидродинамического динамо // ПМТФ. 1973. N 6. С. 47 - 51.

2. Краузе Ф., Редлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо М: Мир.-1984. 343с.

Простая теория водяного зонтика

В.В. Русаков (Пермь)

Хорошо известно, что при нормальных условиях из чистой воды не удается выдувать большие пузыри, подобные тем, что легко получаются из мыльных растворов. В то же время, свободно текущие водные пленки могут образовывать достаточно большие устойчивые поверхности различного вида. В настоящей работе предложена простая модель для описания формы струи фонтана типа водяного зонтика. В таком фонтане тонкая пленка текущей воды образует аксиально-симметричную поверхность, форма и размеры которой определяются, прежде всего, геометрией рассеивающей головки, напором воды и силой тяжести.

В предлагаемой модели уравнение непрерывности для несжимаемой жидкости сводится к постоянству потока через любое горизонтальное сечение. За скорость жидкости в данной точке пленки принимаем ее величину, усредненную по нормальному сечению, а толщину пленки считаем малой по сравнению со всеми другими характерными размерами изучаемой фигуры. В силу аксиальной симметрии задачи полагаем, что каждая частица жидкости движется по образующей под действием силы тяжести, поверхностного натяжения и избыточного давления в замкнутом объеме, образованном водным зонтиком и поверхностью воды в резервуаре.

Наблюдения над интерьерным фонтаном показали, что устойчивая стационарная форма зонтика характеризуется прямым углом встречи текущей пленки с поверхностью воды в резервуаре. Подстройка угла происходит по механизму водоструйного насоса: движущаяся жидкая пленка увлекает за собой окружающий воздух и в зависимости от угла падения перекачивает его либо внутрь зонтика, либо наружу. В нашей модели эффект стабилизации угла и, соответственно, формы водяного пузыря, описывается введением малого избыточного давления. Так для исследованного фонтана с расходом ~ 0.3 л/с и максимальным диаметром около 35 см это давление не превышает 0.1 мм водного столба. Измерение времени установления стационарной формы фонтана позволило получить численную оценку эффекта увлечения воздуха движущейся водной пленкой (~ 0.07 л/с). Проведенные расчеты показали, что предложенная модель весьма хорошо описывает форму такого своеобразного водяного пузыря. Из анализа полученных уравнений следует, что при фиксированном расходе увеличение угла выброса струи фонтана должно привести к потери устойчивости его формы. Аналогичное явление было недавно обнаружено [1] при изучении формы водяных пузырей, получаемых отражением тонкой вертикальной струи вниз от горизонтально расположенного диска, диаметр которого в 3-4 раза больше диаметра струи.

1. C.Clanet, Phys. Rev. Lett. 85, 5106-5109 (2000)

Моделирование и расчет усадки композитного материала при воздействии светового потока

В.И. Самсонов, А.В. Шульгин (Новосибирск)

При записи и воспроизведении голограмм образующиеся надмолекулярные структуры претерпевают существенные изменения не только под влиянием светового излучения, но и из-за усадки материала вследствие конверсии вещества, приводящей к деформации этих структур. Следствием этого эффекта является искажение спектрального состава световой волны, восстановленной из голограммы. При оптимизации голографических материалов необходимо создание моделей такого деформирования с учетом межфазных переходов, реологии материалов, влияния излучения. Работа посвящена моделированию и расчету процесса усадки композитного материала (КМ) неоднородного по высоте плоского пакета и находящегося под воздействием энергетического светового потока. Получены конечные соотношения для относительной деформации в зависимости от физико-механических свойств субструктурных элементов композиции и характеристик светового излучения. Приведены примеры расчетов для конкретных модельных композиций и получено удовлетворительное их соответствие с имеющимися экспериментальными данными.

Анализ геомеханических процессов с учетом реологических свойств пород

Н.А. Самоделкина (Пермь)

Для учета реологических процессов, происходящих в массивах горных пород под действием природных и техногенных факторов, была разработана процедура расчета напряженно - деформированного состояния (НДС) на основе метода конечных элементов (МКЭ). Согласно ей, расчет проводим в несколько этапов: первоначально определяем поля напряжений и деформаций от действия гравитационных сил с учетом природной латеральной изменчивости физико - механических свойств исследуемой зоны. На последующих временных этапах находим дополнительные перемещения, обусловленные техногенным воздействием. Общее НДС определяем как суперпозицию полученных решений.

Для описания развития процесса деформирования во времени, то есть, как изменялись дополнительные перемещения, в данной задаче использовали принцип Вольтерра с применением обобщенного ядра Абеля, реологическое уравнение при этом записывалось через девиаторные части тензоров напряжений и деформаций.

Основываясь на предположении, что на каждом временном шаге значения компонент девиатора напряжений являются постоянными величинами, а значения шаровых тензоров напряжения и деформаций связаны законом Гука, то после некоторых преобразований получим следующее выражение:

$$\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^{H} = \frac{1}{E^{*}}\left[\sigma_{ij}(1+\nu^{*}) - 3\nu^{*}\delta_{ij}\sigma_{ij}\right].$$

Последнее соотношение аналогично обобщенному закону Гука, связывающему напряжения и деформации на данном временном шаге; ε_{ij}^{H} - здесь представлены как начальные деформации, обусловленные напряжениями на предыдущих временных шагах; E^{*}, ν^{*} - соответственно, приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона на данном временном шаге.

Предложенный принцип моделирования реологического процесса аналогичен «объединению» методов теории малых упруго - пластических деформаций: метода переменных параметров упругости и метода начальных деформаций. Численная реализация данного подхода легко осуществляется в рамках МКЭ.

Предложенная методика была использована при контрольных расчетах НДС на участке обрушения пород рудника СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей.

Трансляционное движение коллапсирующих кавитационных пузырьков

Г.Н. Санкин (Новосибирск)

Методом скоростной киносъемки исследована динамика взаимодействующих кавитационных пузырьков в проходящей сфокусированной ударной волне, состоящей из фазы сжатия и разрежения. Показано, что движение пузырьков вдоль направления движения волны происходит преимущественно под действием давления; поперечное движение пузырьков имеет место за счет межпузырькового взаимодействия. Показано, что скорость движения центра масс пузырька достигает максимального значения в момент коллапса.

Моделирование фазового разделения в растворе полимера в процессе формирования полимерного геля

А.Л. Свистков (Пермь)

Получение гелей из раствора полимера приводит к образованию материала, структура которого напоминает губку с очень мелкими ячейками. В работе предложена математическая модель, позволяющая исследовать на компьютере условия появления фаз в полимерном геле на стадии его образования. Рассматривается фазовое равновесие двух фаз: полимерной сетки, которая формируется в результате сшивания полимерных цепей (гель - фаза материала) и фазы, представляющей собой раствор несшитых полимерных цепей в смеси низкомолекулярных жидкостей (водном растворе молекул мономера и других компонентов).

В модели учитывается состав исходного раствора, степень полимеризации полимерных цепей в момент присоединения их к гель - фазе, изменения объема полимерной сетки при ее набухании, изменение длины статистического сегмента полимерной цепи (сегмента Куна) при изменении состава смеси.

В отличие от классических моделей набухания полимерных систем, предложено учитывать в свободной энергии материала ограниченную возможность увеличения объема полимерного геля, связанную с конечностью длин полимерных цепей. Показано, что учет структурных ограничений на расширения полимерной сетки имеет исключительно важное значения при моделировании условия фазового равновесия.

В предложенной модели используется более общая гипотеза изменения объема смеси, чем гипотеза аддитивности объемов ее компонентов. Вместо объемных долей растворителей в качестве параметров состояния среды применяются понятия молярных плотностей компонентов системы.

Рассмотрен случай, когда скорость присоединения плавающих в растворе молекул полимера к гель - фракции пропорциональна объемной доле гель - фракции в системе (объемной доле первой фазы) и объемной плотности полимерных цепей во второй фазе. В компьютерных экспериментах хорошо видны три стадии процесса. Вначале идет формирование полимерных цепей золь-фракции в растворе. После этого наступает этап объединения отдельных цепей в гель - фракцию и выделение ее в виде областей самостоятельной фазы. На третьей стадии процесса появляющиеся полимерные цепи быстро присоединяются к гель - фракции. Вторая фаза практически не содержит полимерных цепей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 01-03-96487).

Метод получения определяющих уравнений вязкоупругих деформируемых материалов и вязкоупругих жидкостей с учетом конечных деформаций среды

А.Л. Свистков (Пермь)

Для построения математической модели среды с учетом ее вязкоупругого поведения, конечных деформаций и способности материала течь при определенных условиях предложено использовать символьную схему механического поведения. Схема состоит из соединенных произвольным образом упругих и вязких элементов. Возможно также использование в модели пластических элементов.

Поведение упругих элементов схемы определяется зависимостями, связывающими девиатор тензора напряжений Коши соответствующего элемента с девиатором тензорной функции от левого тензора растяжений этого элемента.

Для задания свойств вязких элементов используется пропорциональная зависимость между девиатором тензора напряжений Коши вязкого элемента и девиатором тензорной меры скорости его деформирования. Каждой точке соединения элементов на схеме соответствует тензорная мера скорости изменения состояния среды. Разность тензорных мер скорости изменения состояния левой и правой точек у каждого из элементов схемы равна тензорной мере скорости их деформирования. В левой точке схемы тензорная мера скорости изменения состояния равна тензору скорости растяжения среды, в правой имеет нулевое значение.

Потенциал свободной энергии среды представлен в виде функции от температуры и кратностей удлинений упругих элементов символьной схемы. Показано, что предлагаемый метод построения определяющих уравнений приводит к автоматическому удовлетворению неравенства диссипации.

Каждой точке соединения элементов на схеме соответствуют сформулированные в виде тензорного уравнения “условия равновесия”. Смысл его заключается в следующем. Сумма тензоров напряжений Коши элементов, соединяемых с точкой слева, равна сумме напряжений Коши элементов, соединяемых с точкой справа. Данное условие имеет простую физическую аналогию. Тензоры напряжений Коши можно рассматривать как действующие на точки силы в девятимерном пространстве. Для равновесия необходимо, чтобы сумма сил, действующих на точку слева, равнялась сумме сил, действующих на точку справа. При этом полагается, что на левую точку символьной схемы слева и на правую точку справа действуют тензоры напряжений Коши рассматриваемой среды.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96404).

Экспериментальное исследование характеристик деформационного процесса на основе анализа изменения рельефа поверхности образцов

О.В. Семенова (Н. Новгород)

В работе предлагается экспериментальная методика исследования процессов пластического деформирования и разрушения конструкционных и природных материалов, развивающихся на разных масштабных уровнях. Методика включает в себя ряд необходимых шагов: подготовка образца, выбор исследуемой части поверхности, маркирование, нагружение и сканирование поверхности. Полученные данные о топографии поверхности после предварительной цифровой обработки являются исходными данными для численной процедуры определения смещений и деформаций участков исследуемой области поверхности. Численная процедура является уникальной частью методики и составляет ее основу, она состоит из нескольких взаимосвязанных этапов, решающих задачу идентификации системы, преобразующей рельеф до деформации в рельеф после деформации.

Для реализации численной процедуры разработаны специальные алгоритмы [1], использующие методы интерполяции, оптимизации и распознавания образов. Проведена серия натурных экспериментов по апробации разработанных алгоритмов [2]. В ходе проведения экспериментов с различными материалами (резина, олово, свинец, алюминий) выявлены преимущества предлагаемой методики по сравнению с существующими методами измерения смещений. Во-первых, она позволяет с субпиксельной точностью строить поля смещений, определять все компоненты тензора дисторсии (или производных смещения) на плоскости. Во-вторых, она не зависит от того, какая сканирующая аппаратура используется для получения топографических данных (эксперименты проводились с использованием оптико - телевизионной системы, спекл - интерферометрии и высокоразрешающего зондового микроскопа). В-третьих, нет необходимости нанесения специальных меток, искажающих поверхность, что существенно упрощает проведение эксперимента.

Разработанные алгоритмы могут стать основой для проектирования алгоритмического программного обеспечения для автоматизированной измерительной системы изучения процессов деформирования материалов.

1. Семенова О.В., Морозов О.А. Количественное оценивание неоднородных полей деформаций на основе методов многомерной оптимизации // Тезисы докладов 4-ой всероссийской конференции молодых ученых «Физическая мезомеханика материалов», Томск, ИФПМ СО РАН, 26-30 ноября 2001г. С.61-62.

2. Семенова О. В. Методы расчета полей смещений и деформаций на основе анализа изменения рельефа поверхности. Дис. канд. физ.-мат. наук.-Н.Новгород: 2002, 144с.

Об одном методе решения векторных задач дифракции, основанном на аналитических представлениях волновых полей: интегралах Стрэттона – Чу, интеграле Зоммерфельда и ряде Аткинсона - Уилкокса

А.М. Серебренников (Пермь)

Задача рассеяния волнового поля заданных источников ограниченным телом, находящимся в однородной и изотропной среде, является классической задачей математической теории дифракции. Для ее решения в работе [1] автором были получены оригинальные определяющие уравнения интегро - дифференциального типа и показана их эквивалентность дифференциальной краевой задаче для системы уравнений Максвелла. Система интегро - дифференциальных уравнений сформулирована относительно двух вспомогательных скалярных функций - “нулевых” коэффициентов ряда Аткинсона - Уилкокса. Векторы электромагнитного (ЭМ) поля могут быть восстановлены по этим функциям с помощью некоторых рекуррентно - дифференциальных операторов. Метод алгебраизации задачи основан на разложении неизвестных в ряды Фурье по системе сферических угловых функций. При этом интегро - дифференциальная система сводится к алгебраической относительно неизвестных коэффициентов разложений Фурье. В целях верификации метода была решена задача дифракции плоской ЭМ волны на идеально проводящем кубе для существенно резонансного случая ($a/\lambda \geq 1$, a - длина ребра, λ - длина волны), показавшая хорошее совпадение результатов с известными литературными расчетными и экспериментальными данными [2].

В настоящей работе получена новая форма интегро - дифференциальных уравнений на основе двух аналитических представлений поля – интегралах Стрэттона-Чу и интеграле Зоммерфельда-Вейля (интеграле плоских волн). Приводятся результаты решения задачи дифракции на идеально проводящих кубе и параллелепипеде для различных волновых размеров этих тел ($1 \leq a/\lambda \leq 8$) и способов возбуждения.

Перспективным направлением применения и развития метода являются задачи дифракции на телах больших электрических размеров ($a/\lambda \geq 100$), представляющие практический интерес. Прогресс здесь может быть достигнут, в частности, за счет “распараллеливания” алгоритмов при использовании ресурсов суперкомпьютеров. Возможные алгоритмические решения обсуждаются в докладе.

1. A.Serebrennikov. Proc. of 12th Int. Symp. On Antennas JINA 2002, Nice, France, 12-14 Nov. 2002. PP. 209-212.

2. Р. Пенно, Г. Тиле, К. Пасала // ТИИЭР. 1989. Т.77. № 5. С.195-203.

О бифуркациях режимов вибрационной и тепловой конвекции, порождаемых кривизной полости

Р.Р. Сираев, А.Н. Шарифулин (Пермь)

Вибрационная тепловая конвекция [1] является одним из основных механизмов возбуждения движения неизотермической жидкости в условиях орбитальной космической станции. Стационарные режимы как вибрационной, так и обычной тепловой конвекции при изменении параметров испытывают разнообразные бифуркации, приводящие к резкой смене режимов теплопереноса. В [2] было установлено, что бифуркации стационарных режимов свободной тепловой конвекции, возникающие при плавных изменениях направления подогрева и числа Рэлея, порождаются особенностью отображения типа сборки Уитни. В этой же работе была обобщена модель Лоренца [3] на случай конвекции в замкнутой полости при произвольных направлениях подогрева. Было показано, что обобщенная модель Лоренца допускает аналитическое решение, позволяющее получить вид поверхности стационарных состояний в пространстве (ψ, Ra, α), где ψ - функция тока, Ra - число Рэлея, α - направление подогрева.

В настоящей работе обобщенная модель Лоренца модифицирована и используется для анализа бифуркаций стационарных режимов вибрационной конвекции, возникающих вследствие изменения кривизны полости, и вибрационного числа Рэлея. Получен пространственный вид поверхности стационарных состояний в пространстве (ψ, Rv, γ), где ψ - функция тока, Rv - вибрационное число Рэлея, γ - кривизна полости. Результаты моделирования с помощью обобщенной модели Лоренца сравнивались с результатами численного решения уравнений свободной тепловой и вибрационной конвекции.

Показано, что поверхность стационарных состояний качественно отличается от полученной с помощью модели Лоренца. Получено, что бифуркационная кривая имеет экстремум. Это приводит к возникновению бифуркаций сложного вида.

Обсуждаются также результаты численного и аналитического исследования движения жидкости и теплопереноса в условиях совместного действия обоих механизмов конвекции.

1. Gershuni G. Z., Lyubimov D. V. Thermal vibrational convection. John Wiley & Sons. England. 1998, 358p.

2. Nikitin A. I., Sharifulin A. N. Concerning the bifurcations of steady-state thermal convection regimes in a closed cavity due to the Whitney folding-type singularity. [Journal Paper] Heat Transfer - Soviet Research, vol.21, no.2, March-April 1989, pp.213-21. USA.

3. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow.-J. Atmospheric Science, 1963, v.20,p.130-141.

Течение полимерной жидкости в специальных шнеках с продольной циркуляцией

Е.В. Славнов, С.И. Уржунцева, В.И. Янков (Пермь)

Шнековые машины являются наиболее распространенным видом оборудования, предназначенным для проведения процессов смешения расплавов полимеров с различными добавками (красителями, пигментами, наполнителями и т. д.). Интенсивное перемешивание расплавов в шнековых смесителях достигается за счет того, что в них, кроме активного течения вдоль канала шнека, существует циркуляционное течение в направлении поперек канала. Основным недостатком шнековых смесителей является отсутствие продольных циркуляций расплава, т.е. течений от выхода аппарата к входу, что не позволяет осуществить непрерывное выравнивание колебаний вводимых в расплав добавок, вызванных неточностью работы дозирующих систем во времени. Этот недостаток можно устранить, используя двухзаходные шнековые смесители с каналами разной глубины и ширины. Действительно, в шнековом смесителе такой конструкции при определенных условиях можно организовать продольную циркуляцию расплава. Напорно - расходные характеристики (НРХ) для глубокого и мелкого каналов для ньютоновской жидкости при отсутствии радиальных зазоров между гребнями шнека и корпусом линейны и имеют различный наклон. Мелкий канал смесителя развивает более высокое давление, чем глубокий канал, но расход его меньше. При создании на выходе из смесителя перепада давления больше, чем может развить глубокий канал, но меньше, чем может развить мелкий, жидкость в глубоком канале потечет от выхода аппарата ко входу, т.е. расход расплава будет через этот канал отрицательным. В мелком же канале расход остается положительным. Наличие радиального зазора на гребне шнека, разделяющем мелкий и глубокий каналы, резко интенсифицирует процесс смешения за счет перетекания расплава из одного канала в другой, что совместно с продольной циркуляцией улучшает качество смеси.

Показана возможность организации продольной циркуляции вдоль каналов шнековых машин; определены режимы их работы при наличии и отсутствии продольной циркуляции; установлена область геометрических размеров шнеков, когда продольную циркуляцию организовать невозможно; исследовано влияние утечек на НРХ аппарата и потребляемую им мощность. Показано, что при течении в винтовых каналах разной глубины и ширины при наличии радиального зазора на одном из гребней шнека градиенты давления по обоим каналам одинаковы, и организуется движение, осуществляющее интенсивный обмен между каналами и дающее в каждом сечении в направлении поперек каналов нулевой расход жидкости.

О моделях эволюции напряженного состояния твердых тел в условиях релаксационного перехода

О.Ю. Сметанников, Н.А. Труфанов (Пермь)

Релаксационные переходы в материалах (например, стеклование) могут сопровождать процессы изготовления конструкций, если при этом происходит изменение температур в достаточно широком диапазоне. При наличии пространственно - временной неоднородности температурных полей, неоднородности свойств материала неизбежно появляются внутренние напряжения, прогнозирование которых представляет значительный интерес с точки зрения оценки прочности и эксплуатационных качеств изделия.

Рассматривается ряд предложенных моделей термомеханического поведения материалов с учетом протекания релаксационного перехода. Основное внимание уделяется установлению взаимосвязи тензоров напряжений и деформаций и привлекаемых кинетических уравнений, описывающих эволюцию дополнительных параметров уравнений. Дается характеристика установочных экспериментов для идентификации материальных функций и констант этих уравнений. Приводятся результаты решения модельных задач, иллюстрирующих возможности моделей по описанию качественных закономерностей изменения напряжений в стеклующейся системе. Производится сравнение результатов с экспериментом.

На примере решения ряда задач по прогнозированию технологических и остаточных напряжений в конструкциях из полимерных и композиционных материалах показана эффективность применения разработанных подходов.

Колебательная и параметрическая термомагнитная конвекция в стратифицированных феррожидкостях

Б.Л. Смородин (Пермь), М.И. Шлиомис (Беэр-Шева, Израиль)

Магнитные жидкости (феррожидкости) представляют собой коллоидные растворы магнитных частиц в обычных (немагнитных) носителях. Термомагнитная конвекция в таких жидкостях возникает благодаря температурной зависимости их намагниченности. Под влиянием приложенных градиентов магнитного поля и температуры на более холодные и, следовательно, сильнее намагниченные элементы магнитной жидкости действует и большая сила в направлении градиента магнитного поля. Эта сила стремится перемешать жидкость, что и приводит к конвекции. Механическое равновесие жидкости возможно только в случае, когда градиенты магнитного поля и температуры параллельны друг другу. В последнем случае возникает вопрос об устойчивости возможного равновесия.

Феррожидкость следует рассматривать как бинарную смесь, в которой возможен диффузионный перенос магнитных частиц – магнитофорез. Благодаря ему, в неоднородном магнитное поле устанавливается градиент концентрации магнитных частиц. В конвективной ячейке размером в несколько миллиметров равновесное распределение частиц устанавливается в течение десятков часов, тогда как стационарное распределение температуры – за время порядка десятков секунд. Наличие столь сильно различающихся временных масштабов делает возможным два различных сценария термомагнитной конвекции. Если неоднородное магнитное поле и градиент температуры приложены одновременно и внезапно, то стационарная конвекция возникает раньше, чем успевает сформироваться неоднородный профиль концентрации, т.е. феррожидкость ведет себя как однородная (однокомпонентная) жидкость. Если же разность температур прикладывается лишь после того, как установится градиент концентрации магнитных частиц в неоднородном поле, то неустойчивость всегда носит колебательный характер. Для жидкости, заполняющей ячейку Хеле-Шоу, определены границы устойчивости и собственные частоты нейтральных колебаний. В случае параметрического возбуждения, вызванного переменной составляющей магнитного поля, найдены зависимости порогов термомагнитной конвекции от частоты и амплитуды модуляции поля и определены резонансные частоты. Показано, что, в условиях параметрического резонанса модуляции поля малой амплитуды позволяют существенно понизить критический градиент температуры.

Автомодельные закономерности эволюции структуры плоской волны напряжений

М.А. Соковиков (Пермь)

Проведено исследование автомодельных закономерностей процесса деформирования конденсированных сред при высокоскоростном ударе. Для этого использовалась ранее разработанная теория, в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микросдвигов на деформационные свойства конденсированных (твердых и жидких) сред. В качестве примера рассматривались алюминий, медь и вода.

В результате численного моделирования показано, что автомодельный характер поведения конденсированных сред при высокоскоростном ударе связан с тем, что, начиная с определенных скоростей соударения, их эффективные свойства начинают слабо зависеть от условий нагружения. Это является результатом множественных ориентационно - кинетических переходов в ансамблях микросдвигов, вследствие чего наблюдается резкое падение сопротивления среды сдвиговым нагрузкам, что обусловлено особенностями кинетики накопления микросдвигов, поведением их самоорганизованных ансамблей, результатом которого является асимптотический характер зависимости релаксационных свойств материала от скоростей деформирования, а значит, и скоростей соударения.

Наибольшая скорость роста параметра плотности микросдвигов достигается при резком изменении ориентационной моды микросдвигов (ориентационный переход). В результате изменяются эффективные макроскопические свойства среды. Причем, чем больше глубина проникания в область метастабильности (с повышением скорости деформаций), тем более высокие значения скорости роста плотности микросдвигов достигаются в процессе кинетического перехода. При достижении предельно возможной глубины проникания в область метастабильности значения скорости роста микросдвигов максимальны и практически не изменяются при увеличении скорости соударения. Другими словами, скорость генерации микросдвигов в условиях ориентационного перехода определяет деформационную динамику.

Автомодельная зависимость скорости деформаций от напряжений на фронте плоской ударной волне, имеющая четвертый порядок для широкого класса материалов, экспериментально обнаруженная D.E.Grady, связана с универсальностью реакций конденсированных сред при высоких скоростях деформирования, которая может быть объяснена адиабатическим подчинением скорости деформации деформационной кинетике.

Математическое моделирование СВС-технологий

Л.С. Стельмах, А.М. Столин (Черноголовка)

Около 20 лет назад были начаты исследования, связанные с разработкой новых технологических процессов СВС, основанных на сочетании горения и сдвигового деформирования горячих продуктов синтеза: прессование, экструзия, наплавка и измельчение и др. При оптимизации экспериментальных схем этих процессов весьма эффективным оказался метод математического моделирования. Работы в этой области развивались по следующим направлениям:

- разработка тепловых моделей СВС - экструзии и прессования, позволяющих рассчитывать температурные поля, возникающие как в материале образца, так и в элементах пресс - оснастки;

- разработка неизотермических реодинамических моделей СВС-компактирования, которые учитывали реологическое поведение материалов и позволяли изучить не только температурный режим, но и кинетику уплотнения и напряженно - деформированное состояние материала;

- применение тепловых и реодинамических моделей в конкретных практических приложениях при получении различных изделий методами СВС-компактирования;

- разработка неизотермических методов расчета пресс - оснастки для СВС-процессов, учитывающих существенную нестационарность и неизотермичность процессов, а также термическую градиентность по толщине стенок пресс - формы.

В дальнейшем были разработаны неизотермические реодинамические модели СВС - измельчения, использующего давление со сдвигом при получении порошковых материалов, и СВС - наплавки, которая основана на растекании продуктов горения по поверхности твердой основы под влиянием сил гравитации.

В настоящем докладе освещаются основные аспекты математического моделирования указанных технологических процессов. Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы РАН "Новые принципы синтеза и создание материалов с заданными свойствами" и РФФИ (грант № 01-03-33014).

Критические явления реодинамического происхождения

Л.С. Стельмах, А.М. Столин (Черноголовка)

В настоящем докладе сделана попытка рассмотреть основные представления и наиболее интересные результаты развития теории ряда критических явлений реодинамического происхождения. Нами подробно исследован ряд критических явлений, обусловленных взаимодействием диссипативного тепловыделения и теплоотвода: гидродинамический тепловой взрыв и явление гидродинамического воспламенения и потухания. Интересные эффекты возникают при взаимодействии вязкоупругого деформирования и диссипативного тепловыделения. Показано, что в этом случае возможен автоколебательный режим течения с релаксационным характером колебаний напряжения и температуры. При изучении критических явлений в структурированных системах возможно новое явление – образование диссипативных структур при вискозиметрическом течении. С этих позиций дано объяснение структурному разнообразию химических волокон, получаемых при сдвиговом деформировании расплавов гибко - цепных полимеров вблизи температуры плавления.

На основе математического моделирования реодинамических явлений при растекании предложено возможное объяснение известных экспериментальных фактов, связанных с неустойчивостью процессов деформирования, наблюдаемых в вискозиметрических экспериментах и в технологии нанесения полимерных покрытий. Показана возможность реализации структурно - однородных и пространственно структурно - неоднородных режимов течения. Проведена численная реализация поставленных задач на компьютере, сопоставлены численные результаты с полученными экспериментальными данными вискозиметрических экспериментов. Разработаны методические вопросы определения параметров реологической модели, позволяющие проводить оценку интенсивности структурных превращений, вероятности ориентационных поворотов и деформации связей в зависимости от природы растворителя и специальных добавок.

В последнее время все больший интерес вызывают критические явления при деформировании вязких сжимаемых материалов, каковыми являются порошки тугоплавких соединений при высоких температурах. В докладе обсуждается особенности этих явлений применительно к технологии СВС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы РАН "Новые принципы синтеза и создание материалов с заданными свойствами" и РФФИ (грант № 01-03-33014).

Магнитовязкий эффект и релаксация в магнитной жидкости

В.И. Степанов (Пермь)

Связь магнитных и механических степеней свободы частиц является главной особенностью магнитных жидкостей. Наиболее явно она проявляется в *магнитовязком* эффекте – заметном увеличении вязкости ферроколлоидов при включении магнитного поля. Впервые он наблюдался экспериментально в работе [1]. Причиной эффекта являются магнитные крутящие моменты, которые препятствуют свободному вращению частиц в сдвиговом потоке. Количественной мерой эффекта служит коэффициент вращательной вязкости η_R , зависящий как от величины внешнего приложенного магнитного поля H, так и от внутреннего поля магнитной анизотропии H_A частиц. Предыдущие теоретические расчеты магнитовязкого эффекта проводились или в приближении жестких диполей ($H_A >> H$), или в противоположном пределе сильных магнитных полей ($H >> H_A$) (в работах [2] и [3], соответственно). Докладываемая теория свободна от этих упрощений и позволяет рассчитать η_R при произвольном соотношении между внутренним и внешним полями. Исходной точкой расчетов служит формула Грина-Кубо, устанавливающая связь между коэффициентом вращательной вязкости и временем релаксации поперечных (по отношению к внешнему полю) компонент намагниченности. Намагничивание ферромагнитной жидкости сопровождается двумя релаксационными процессами. Один из них - внешний - связан с вращением частицы (вместе с ее магнитным моментом) в несущей жидкости. Этот механизм доминирует для частиц с сильной магнитной анизотропией, "привязывающей" магнитный момент к телу частицы. Однако в магнитомягких частицах энергии связи оказывается недостаточно для блокирования собственного вращения магнитного момента внутри частицы, чем и обусловлен внутренний релаксационный механизм. Используя обобщенное уравнение Фоккера-Планка [4,5], учитывающего на равных правах оба релаксационных процесса, найдена зависимость η_R от приложенного магнитного поля и магнитной анизотропии частиц. Особо следует отметить обнаруженный максимум на кривой полевой зависимости коэффициента вращательной вязкости. Таким способом проявляет себя переключение (кроссовер) каналов релаксации магнитного момента частицы с внешнего на внутренний при выполнении условия $H \approx H_A$. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 02-02-17221).

1.J. P. McTague, J. Chem. Phys. 51 (1969) 133.

2. М.А. Марценюк, Ю.Л. Райхер, М.И. Шлиомис, ЖЭТФ 65 (1973) 834.

3. Ю.Л. Райхер, М.И. Шлиомис, ЖПМТФ №4 (1974) 41.

4. В.И. Степанов, М.И. Шлиомис, Изв. АН СССР, сер. физ. 55 (1991) 1.

5. M.I. Shliomis and V.I. Stepanov, J. Magn. Magn. Mater 122 (1993) 196.

Оптимизация методов численного интегрирования каскадных моделей

Р.А. Степанов (Пермь)

В работе рассматривается возможность снижения временных затрат при интегрировании системы ОДУ, содержащей слагаемые типа вязкого трения. Идея метода состоит в применении подстановки, исключающей из уравнения диссипативное слагаемое. Предложена конкретная реализация этого алгоритма для метода Рунге-Кутта 4-го порядка. Приводиться оценка, дающая отношение шагов по времени с использованием и без использования предлагаемой техники. Эффективность описанного алгоритма показана на примере расчетов каскадных моделей турбулентности. Для задач такого типа шаг интегрирования увеличивается на порядки.

Автору приятно выразить свою благодарность Фонду содействия отечественной науке.

Численное моделирование турбулентных течений с использованием каскадных моделей

Р.А. Степанов, П.Г. Фрик, А.В. Чупин (Пермь)

Разработка методов прямого численного моделирования турбулентных течений имеет большое значение в гидродинамике и привлекает особенный интерес в связи с бурным развитием многопроцессорной техники. Однако воспроизведение точной картины турбулентного течения остается для сеточных методов еще далеко за пределами их возможностей. В докладе рассматривается новый подход, в котором используются каскадные модели турбулентности (shell models в английском варианте) в качестве элемента расчетной схемы, отвечающей за описание подсеточных процессов. Каскадные модели представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений и позволяют описывать каскадные процессы в турбулентных течениях практически с неограниченно большими числами Рейнольдса. С помощью каскадных моделей можно корректно описать поток энергии к диссипативному масштабу, не увеличивая разрешение сетки. Таким образом, предлагается альтернатива существующим полуэмпирическим моделям турбулентности, работающих только в определенном классе задач.

Ключевым моментом подхода является сопряжение сеточного метода с каскадными моделями. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование понятия турбулентной вязкости. Вычисляя отток энергии к мелким масштабам по каскадной модели, можно оценить эффективную вязкость. Такой подход уже использовался в работе [1], где исследовалась задача геодинамо с единой каскадной моделью. Нами предлагается ввести для каждой статистически однородной области собственную каскадную модель для получения пространственного распределения турбулентных свойств. Другой вариант заключается в использовании вейвлет - преобразованием поля скорости. Это поможет установить взаимнооднозначное соответствие пространственным распределением и локальными спектральными характеристиками. В качестве тестовой задачи рассматривается течение в плоском бесконечном канале, где каскадная модель вводиться для каждого горизонтального слоя узлов сетки. Тем самым воспроизводится вертикальная структура среднего турбулентного течения. Одним из важнейших критериев построения метода является возможность эффективной параллелизации алгоритма вычислений.

1. Frick P., Reshetnyak M., and Sokoloff D. Combined grid-shell approach for convection in a rotating spherical layer // EuroPhys.Lett. 2002. V.59. N.2. P.212-217

О влиянии скоростей упругих деформаций на докритический рост трещины в упругом нелинейно- вязком материале в среде с поврежденностью в связанной постановке задачи

Л.В. Степанова (Самара)

Изучение напряженно-деформированного состояния вблизи вершины как стационарной, так и растущей трещины, с учетом процесса накопления рассеянных повреждений является предметом многочисленных исследований. Особый интерес вызывает рассмотрение взаимного влияния распределения напряжений, деформаций, их скоростей и поля поврежденности, что приводит к необходимости формулировки связанных постановок задач (в различных комбинациях: "упругость - поврежденность", "пластичность - поврежденность", "ползучесть - поврежденность" и более сложных) и их решения. Предметом данного исследования является изучение влияния скоростей упругих деформаций на докритический рост трещины в упругом нелинейно - вязком материале (со степенным законом теории установившейся ползучести) в поврежденной среде в связанной постановке (связка “упругость - поврежденность”, “ползучесть - поврежденность”). На основе проведенного асимптотического анализа полей напряжений, скоростей деформаций и скалярного параметра сплошности вблизи вершины растущих трещин антиплоского сдвига и нормального отрыва установлено, что скоростями упругих деформаций в непосредственной окрестности вершины растущей трещины пренебрегать нельзя, поскольку скорости упругих деформаций имеют особенность вида $1/r$, где r - расстояние от кончика продвигающейся трещины, в то время как скорости деформаций ползучести являются ограниченными величинами. Исследована структура области, прилегающей к вершине трещины и ее берегам. Показано, что перед вершиной трещины имеется область активного накопления повреждений (зона, в которой справедливо кинетическое уравнение, постулирующее степенной закон накопления повреждений), а к берегам трещины примыкает область полностью поврежденного материала (зона, где все компоненты тензора напряжений и параметр сплошности обращаются в нуль). То есть, процесс распространения макротрещины можно представить как продвижение целой области поврежденного материала. Определены границы областей активного накопления повреждений, отделяющие эти зоны от областей, в которых процессом накопления повреждений можно пренебречь. Дана оценка скорости распространения трещины. Проведено исследование "дальнего" поля напряжений (распределение напряжений при больших расстояниях от вершины трещины). Для чего дан сравнительный анализ скоростей упругих деформаций и деформаций ползучести при $r \to \infty$.Установлено, что скорости упругих деформаций вносят основной вклад в асимптотическое разложение скоростей деформаций.

Об одном алгоритме расчета оптимальных остаточных напряжений при жестком нагружении упругого тела

В.В. Стружанов (Екатеринбург)

Одним из способов влияния на прочность элементов конструкций является создание в них при изготовлении собственных (остаточных) напряжений. В зависимости от условий эксплуатации могут формулироваться различные требования, предъявляемые к характеристикам полей остаточных напряжений. В частности, возможна постановка следующей задачи оптимизации напряженного состояния: для заданных перемещений точек границы тела найти такие остаточные напряжения, которые, складываясь с напряжениями, полученными в результате перемещения точек границы, позволяют в отдельных областях тела получать напряженное состояние, сколь угодно близкое к нулю.

Решение данной задачи основано на представлении решения краевой задачи об определении напряжений в теле с защемленной границей при наличии несовместной первоначальной деформации как ортогональной проекции формального тензора напряжений, связанного с тензором первоначальных деформаций законом Гука, на определенное подпространство гильбертова пространства тензоров напряжений. В результате применения такого представления получено операторное уравнение с оператором ортогонального проектирования, равным разности единичного и указанного выше операторов. Решением данного уравнения является тензор остаточных напряжений, снижающий до нуля уровень напряжений от внешней нагрузки в любой, наперед заданной области тела. Показано, что оператор этого уравнения обладает свойством сжатия. Решение тогда ищется методом последовательных приближений. Приведен пример.

Исследование динамического разрушения надрезанных образцов ПММА при электрическом взрыве проволоки на берегах разреза

Ю.В. Судьенков, А.И. Сусликов (С.Петербург)

В работе приводятся результаты экспериментального исследования процесса динамического разрушения надрезанных образцов из ПММА при электрическом взрыве проволоки, введенной в разрез.

Целью исследования являлось моделирование точечного взрыва на берегах разреза, определение величины критической нагрузки и момента страгивания трещины при микросекундной длительности взрыва.

Исследование проводилось на установке электрического взрыва с энергией $E \leq 125$ Дж, $C = 0{,}4$мкФ, $U \leq 25$ кВ.

Была разработана методика, использующая лазерную интерферометрию для измерения временных профилей и величин давления в образцах ПММА, на различных расстояниях от места взрыва. Это позволяло определять начальные параметры ударной нагрузки при электрическом взрыве проволоки на берегах надреза. Возможность контролируемого изменения энергии взрыва позволило определять критические давления страгивания трещины.

Для определения момента страгивания трещины была разработана методика, основанная на явлении светорассеяния при возникновении микронеоднородностей в среде в результате разрушения.

Совокупность измеряемых параметров позволила определить динамический коэффициент интенсивности напряжений и временные характеристики начального процесса развития трещины при локализованной микросекундной ударной нагрузке на берегах надреза.

Погрешность модели Хеле-Шоу

Е.Л. Тарунин (Пермь)

В данной работе выясняется погрешность теоретической модели Хеле-Шоу при различных способах аппроксимации компонент скорости и различных часто используемых допущениях, связанных с учетом вязкого прилипания на узких гранях. Погрешность выясняется при конечных значениях толщины ячейки D на конвективной задаче в вертикальном канале, подогреваемом сбоку и изотермическом течении при постоянном градиенте давления.

Погрешности оценивались по отличию от решения, которое находилось методом сеток без аппроксимации скорости полиномом второй степени, моделирующего плоское течение Пуазейля. Соответствующие разностные уравнения решались на равномерной сетке итерационным методом последовательной верхней релаксации.

Анализировались, в основном, две модели. В первой модели не учитывались условия вязкого прилипания на узких гранях, а во второй – учитывались. В случае второй модели требуется решить соответствующую краевую задачу с малым параметром при старшей производной. Величины соответствующих расходов моделей Q_1 и Q_2 сравнивались с расходом Q, полученным из решения задачи Дирихле методом сеток.

Из результатов видно, что погрешность первой модели по величине расхода менее 2% лишь при $d = D/L < 1/45$. Погрешность второй модели, учитывающей пограничный слой у боковых границ ячейки, при $d < 0.1$ менее 1%. Отличие скоростей первой и второй моделей на середине слоя существенно лишь вблизи границы. Показано, что учет условий вязкого прилипания на узких гранях существенно снижает погрешность модели Хеле-Шоу. Без учета этих условий погрешность модели в конвективной задаче менее 5% лишь при $d < 0.05$.

Отрицательные свойства первой модели усиливаются, если правая (“источниковая”) часть в уравнении движения дает большие значения в пограничном слое. Такая ситуация возможна, например, при интенсивной конвекции, приводящей к температурному пограничному слою и образованию неустойчивой стратификации. Выполненный анализ устойчивости схем двухполевого метода, построенных для эволюционного уравнения второй модели, позволил выяснить их повышенную устойчивость. Расчеты сеточной задачи для широких ячеек ($d > 1$) позволили выяснить, что плоская постановка задачи об устойчивости в случае широких каналов возможна лишь для значений $d > 5$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96407) и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № РЕ-009-0).

Варианты задачи Н.Е. Жуковского о рассеве

Е.Л. Тарунин (Пермь)

Первое сообщение о задаче рассева был сделано Н.Е. Жуковским в декабре 1886 года Политехническому обществу. В этой задаче горизонтальная площадка совершает вращательное движение. На площадке находится тело, которое связано с площадкой силой сухого (кулоновского) трения. При малой величине трения соответствующие дифференциальные уравнения имеют решения, описывающие круговое движение с постоянным значением модуля скорости и радиуса r. Это круговое движение создает условия для падения частицы в сыпучем теле. При этом соответствующей траекторией служит уже винтовая линия. Описанные явления служат основой процесса вибрационного разделения сыпучих смесей.

Рассмотрено 4 варианта задачи Н.Е. Жуковского. В первом варианте к кулоновскому (“сухому”) трению добавлено “вязкое” трение. Последующие три варианта относятся к одномерному движению плоскости с различными усложнениями.

Показано, что задача Н.Е. Жуковского имеет аналитическое решение при добавлении к кулоновскому трению “вязкого” трения. Во втором рассмотренном варианте вместо вращательного движения площадка совершает колебательное движение в одном направлении. В книге Блехмана И.И. и Джанелидзе Г.Ю. «Вибрационное перемещение» (1964) на примере этой задачи подробно разобраны основные методы, применяемые при решении нелинейных задач динамики систем с сухим трением. Здесь приводится два режима установившегося движения с указанием границ для частного случая, когда трение покоя равно трению скольжения. Кроме того, дано сравнение полуамплитуды смещения с радиусом r в задаче Н.Е. Жуковского.

В третьем усложненном варианте одномерного движения смещение площадки вправо и влево происходит за разное время. В этом случае появляется новый параметр, равный отношению “долей периода” k (при k=1 получается вариант, рассмотренный выше). Оказалось, что с точки зрения математики, соответствующее дифференциальное уравнение идентично уравнению движения инерцоида.

В четвертом, также одномерном, варианте предполагалось, что колеблющаяся поверхность искривлена (ее высота описывается параболой) и существует только вязкое трение. В этом случае уравнение движения приобретает вид, похожий на уравнение вынужденных колебаний. Отличие заключается лишь в том, что амплитуда силы пропорциональна квадрату частоты. Найдена соответствующая резонансная кривая.

Работа выполнена при поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № PE-009-0).

Конечноэлементная технология дискретизации по времени конечноэлементных уравнений движения в свертках для задач линейной теории упругости

В.Н. Терпугов (Пермь)

Обсуждается техника построения одношаговых расчетных схем (алгоритмов) для задач линейной теории упругости на основе конечноэлементных (КЭ) уравнений движения в свертках, которые получаются в результате реализации метода Ритца для дискретизации по пространственным переменным функционала Лагранжа в свертках. Эти же уравнения можно получить двукратным интегрированием по времени известного КЭ уравнения движения, полученного реализацией метода Бубнова-Галеркина для дискретизации по пространственным переменным принципа возможных перемещений. Искомым в таком уравнении в сверках является зависящий от времени вектор узловых перемещений КЭ сетки. Векторы начальных перемещений и скоростей входят в это уравнение. Для дискретизации по времени строится конечный элемент с двумя узлами. В качестве узловых значений этого элемента берутся векторы перемещений и скоростей: начальные на левом конце и искомые на правом. В этом случае для дискретизации возможно использование аппроксимирующих полиномов с квадратичной и с кубической аппроксимацией, что приводит к двум различным расчетным схемам. Для изучения свойств получаемых расчетных схем рассматривается задача об исследовании устойчивости и алгоритмического затухания матричного одношагового алгоритма, записанного в общем виде, в частности, включающего рассматриваемые расчетные схемы. Для этого алгоритма выводятся соотношения, означающие выполнение безусловной устойчивости алгоритма к шагу интегрирования и отсутствие алгоритмического затухания. Обсуждаются условия, при которых эти соотношения выполняются. Чтобы обеспечить выполнение полученных соотношений, в изучаемые расчетные схемы при построении вводятся управляющие параметры: три при построении алгоритма с квадратичной аппроксимацией и шесть – с кубической. В результате удается построить два неявных безусловно устойчивых без алгоритмического затухания алгоритма. Пошаговая процедура решения первого алгоритма реализуется на основе метода Холесского. Для второй схемы строится итерационный процесс, при реализации которого учитываются свойства входящих в него матриц, доказывается сходимость и оценивается скорость сходимости. При этом, используя первый алгоритм, удается построить общую для двух алгоритмов эффективную итерационную процедуру, когда решение, полученное с помощью первого алгоритма, используется в качестве начального приближения для второго. Оценивается вычислительная эффективность построенных процедур. Обсуждается программная реализация. Приводятся примеры расчетов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант РФФИ-Урал № 01-01-96489).

Об одной математической модели современных ветротурбин

А.К. Тулепбергенов (Алматы)

Существует большое разнообразие конструкций ветротурбин, но по принципу работы их можно разбить на два основных типа: а) работающие за счет сил давления ветра (парусные), б) за счет подъемной силы крыла (пропеллерные и Дарье). Вращение ветротурбины первого типа происходит вследствие лобового действия силы динамического давления ветра на плоскость рабочей лопасти. Из-за плохообтекаемости рабочих лопастей ветротурбина имеет небольшую быстроходность, ее габариты ограничены, и коэффициент использования энергии ветра не превышает 0,12-0,15. Таким образом, рабочие лопасти такой турбины создают на ветровой поток большее сопротивление, чем снимают с него часть энергии. Производство таких турбин также не развито. Наибольшее применение и развитие на сегодняшний день получили ветроагрегаты, работающие за счет подъемной силы крыла. Они имеют сравнительно высокий коэффициент использования энергии ветра 0,45. Их делят на два типа по расположению вращающихся валов и рабочих лопаток: а) горизонтально - осевые (тип пропеллерный); б) вертикально - осевые (“Дарье”). Все теории по исследованию аэродинамики современных ветротурбин можно разделить на три группы: 1) импульсные теории, основанные на модели следа в виде трубок тока, подразделяющиеся на однотрубчатую, многотрубчатую и двойную многотрубчатую модели; 2) вихревые теории, основанные на модели свободного или жесткого следа; 3) теории местной циркуляции. Хотя все эти модели развивались за рубежом, начиная с 1977 г., на достаточно высоком уровне и были получены хорошие теоретические результаты, сопоставленные с экспериментом, но они не могут раскрыть полную физическую (аэродинамическую) картину взаимодействия ротора «Дарье» с воздушным потоком. В данной работе предлагается математическая модель взаимодействия прямолопастной ветротурбины «Дарье» с воздушным потоком, которая описывается полными уравнениями Навье-Стокса и неразрывности. В качестве аэродинамических сил сопротивления ветровому потоку берутся проекции осредненных сил сопротивления и подъемной силы лопасти (в обратном направлении) на оси OX и OY в виде сосредоточенных источников и входят в правую часть уравнений движения. Для определения этих массовых сил сначала определяется угол атаки и скорость атаки, а коэффициенты подъемной силы и сил сопротивления зависят только от угла атаки. Данную модель можно применить также для расчета аэродинамических параметров ветротурбины пропеллерного типа. В докладе излагаются полученные результаты расчета.

Исследование математической модели движения жидкости Фойгта

М.В. Турбин (Воронеж)

В докладе рассматривается математическая модель движения жидкости Фойгта. Движение жидкости Фойгта характеризуется следующим определяющим соотношением:

$$\sigma = 2\nu\varepsilon + 2\mu\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}, \quad \nu, \mu > 0,$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, а μ – время запаздывания. Модель Фойгта описывает течение вязкой неньютоновской жидкости, которой потребуется время, чтобы прийти в движение под действием внезапно приложенной силы.

Подставляя σ в уравнение движения в форме Коши и учитывая условие несжимаемости жидкости, получим систему уравнений движения жидкости Фойгта:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u_i\frac{\partial u}{\partial x_i}\right) - \nu\Delta u - \mu\frac{\partial\Delta u}{\partial t} + \operatorname{grad} p = f, \ (t,x)\in(0,T)\times\Omega, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} u = 0, \ (t,x)\in(0,T)\times\Omega, \quad (2)$$

Здесь используется соглашение о суммируемости по повторяющимся индексам. Для системы (1), (2) в ограниченной области Ω в R^n *(n=2,3)* с липшицевой границей $\partial\Omega$ рассматривается начально - краевая задача с начальным условием

$$u(0,x) = a(x), \ x\in\Omega, \quad (3)$$

и граничным условием $u\big|_{(0,T)\times\partial\Omega} = 0, \quad (4)$

Введём пространство $W = \{u : u\in C([0,T],V), u'\in L_1(0,T;V)\}$

Основным результатом является следующая теорема.

*Теорема 1***.** При любых $f\in L_1(0,T;V^*)$; $a\in V$ существует единственное слабое решение $u\in W$ задачи (1),(2),(3),(4). Доказательство следует следующей схеме. Поставленная начально - краевая задача заменяется операторным уравнением. Разрешимость операторного уравнения устанавливается методом продолжения решений на основе теории топологической степени с помощью априорных оценок решений. Единственность доказывается с помощью неравенства Гронуолла-Беллмана.

1. Dmitrienko V.T., Zvyagin V.G // Abstract and Applied Analysis. 1997. - V.1,2. - P.1-45.

2. Осколков А.П. // Записки научных семинаров ЛОМИ. 1973. Т.38. С.98-136.

3.Осколков А.П. // Тр. МИАМ СССР. 1987. Т.179. С.124-164.

4. Темам Р.// М. Мир. 1987.

Свойства спектра монотонных возмущений небуссинесковской конвекции в горизонтальном слое

М.Ю. Тяглов (Ростов-на-Дону)

Рассматривается слой изотермически несжимаемой жидкости, снизу ограниченный твердой стенкой, а сверху – упругой пластиной. Зависимость удельного объема V от температуры T считается линейной: $V=1+\alpha T$, где α – коэффициент теплового расширения. Предполагается, что на каждой из границ поддерживается постоянная температура, и ставится вопрос об условиях возникновения свободной конвекции. Используется модель конвекции изотермически несжимаемой жидкости, построенная в [1]. Найдено равновесие задачи, и методом линеаризации исследуется устойчивость этого равновесия. Эта задача изучалась численно в [2]. Колебательная неустойчивость не была обнаружена.

С помощью теории гипо- и гиперосцилляционных дифференциальных операторов, развитой в работе Ю.С. Барковского [3], доказывается, что в линейной краевой задаче для монотонных возмущений существует счетное число простых изолированных положительных собственных значений, роль которых выполняют критические числа Рэлея. Тем самым строго доказывается существование порога устойчивости. Показано также, что с ростом коэффициента жесткости пластины критические числа Рэлея монотонно растут, то есть уменьшение жесткости пластины дестабилизирует равновесие. Аналогичные утверждения справедливы и в том случае, когда верхняя граница свободная и деформируемая и на ней учитывается поверхностное натяжение.

Полученные результаты хорошо согласуются с численными расчетами, проведенными в [2], [4].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-01-00337 и № 01-01-22002).

1. Юдович В. И. Конвекция изотермически несжимаемой жидкости// Деп. В ВИНИТИ, 28.05.99, №. 1699–В99.

2. Тяглов М. Ю. Конвекция изотермически несжимаемой жидкости в горизонтальном слое с упругой стенкой// Тез. докл. Международной школы-семинара "Применение симметрии и косимметрии в теории бифуркаций и фазовых переходов", SCDS – II, (Сочи, Лазаревское, 18-23 сентября, 2001).

3. Барковский Ю. С. Гипоосцилляционные и гиперосцилляционные дифференциальные операторы// Докл. АН СССР. т. 267. №2. 1982. С. 269-271.

4. Надолин К. А. Численное исследование возникновения конвекции в горизонтальном слое сжимаемой жидкости со свободно деформируемой границей// Изв. Сев.-Кав. центра высш. шк. Естеств. науки. 2001. Спецвыпуск. С. 118–121.

О возникновении конвекции изотермически несжимаемой жидкости в горизонтальном слое

М.Ю. Тяглов (Ростов-на-Дону)

Рассматривается слой изотермически несжимаемой жидкости, снизу ограниченный твердой стенкой, а сверху – упругой пластиной или свободной деформируемой границей. Зависимость удельного объема V от температуры T считается линейной: $V=1+\alpha T$, где α – коэффициент теплового расширения. Предполагается, что на каждой из границ поддерживается постоянная температура, и ставится вопрос об условиях возникновения свободной конвекции. Используется модель конвекции изотермически несжимаемой жидкости, построенная в [1]. Найдено равновесие задачи, и методом линеаризации исследуется устойчивость этого равновесия.

В случае упругой крышки задача была исследована численно. Колебательная неустойчивость не была обнаружена в рассматриваемом диапазоне параметров. Проведено аналитическое исследование спектральной задачи, доказаны существование простого счетного изолированного спектра и монотонная зависимость собственных значений (критических чисел Рэлея монотонной неустойчивости) от жесткости пластины.

В случае свободной деформируемой границы задача была исследована численно в [2], построены нейтральные кривые монотонной неустойчивости в зависимости от волнового числа при различных значениях параметра Буссинеска и коэффициента поверхностного натяжения.

Рассмотрена модель конвекции изотермически несжимаемой жидкости в слое, ограниченном свободной деформируемой границей, отличная от модели рассмотренной в [2]. В этой модели имеется длинноволновая неустойчивость так же, как в [3], [4]. Обсуждается асимптотическое поведение критических чисел Рэлея при малых волновых числах в зависимости от остальных параметров задачи. Результаты сравниваются с выводами, сделанными в [5].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-01-00337 и № 01-01-22002).

1. Юдович В. И. Конвекция изотермически несжимаемой жидкости// Деп. В ВИНИТИ, 28.05.99, №. 1699–В99.

2. Надолин К. А. // Изв. Сев.-Кав. центра высш. шк. Естеств. науки. 2001. Спецвыпуск. С. 118–121.

3. Изаксон В. Х., Юдович В. И. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 4. С. 23–28.

4. Изаксон В. Х. // ПМТФ. 1969. № 3. С. 89–92.

5. Непомнящий А. А. // Конвективные течения. Пермь. 1983. С. 25.

Линза NAPL Асимптотический анализ и численное решение для стационарного режима

А.А. Ураскузина, Д.В. Шевченко (Казань)

Рассматривается задача о растекании линзы углеводородного загрязнения по поверхности зеркала грунтовых вод (ЗГВ), находящейся на наклонной поверхности водоупора. Жидкости не смешиваются, плотность углеводородов (УВ) меньше плотности воды. Давление на поверхности линзы равно атмосферному, а мощность и площадь источника загрязнения невелики. Все это позволяет использовать для описания течения углеводорода и «подстилающей» воды модель Буссинеска [1].

Для толщины линзы загрязнения и высоты возмущенного уровня ЗГВ получаем нелинейную систему уравнений типа конвективной диффузии, в которой коэффициенты проводимости прямопропорциональны самим искомым величинам. Уравнения приведены к безразмерному виду, в результате которого в числе определяющих параметров остались только приведенные мощность и область источника, а так же отношение плотностей УВ и воды.

Для оценки мощности линзы вдали от продолжительно действующего постоянного источника проведено асимптотическое исследование стационарного режима. В результате его обнаружена финитность распространения возмущений и ограниченность области распространения загрязнения поперек направлению наклона ЗГВ, что обусловлено существенной нелинейностью системы уравнений.

С использованием оценок, полученных при асимптотическом анализе, проведено численное решение задачи. Получены картины растекания линзы и возмущения ЗГВ при различных параметрах. Интересным фактом, определенным в результате численного решения, является наличие области «проваливания» УВ до водоупора при достаточно большой мощности источника относительно начальной толщины воды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-01-00987).

1. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., «Недра», 1972, 288 с.

Термодинамика дисперсных систем в высокочастотном электромагнитном поле

М.А. Фатыхов (Уфа)

В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния высокочастотных электромагнитных полей на термогидродинамические и диффузионные процессы в дисперсных системах. Показаны зависимости их от частоты и квадрата напряженностей электромагнитного поля, электрических свойств дисперсных систем.

Исследование спирально-вихревой неустойчивости, возбуждаемой модельной силой в условиях ламинарной конвекции

А.В. Фирулев (Пермь)

В работе проводится обсуждение результатов анализа устойчивости решений системы уравнений Буссинеска, описывающих пространственное течение несжимаемой жидкости в подогреваемом снизу протяженном горизонтальном слое, дополненных модельной силой специального вида для трех типов динамических условий на верхней и нижней границе слоя - твердые, смешанные и свободные границы.

В основе исследуемой модели лежит оригинальный подход, позволяющий имитировать некоторые эффекты, типичные для развитой термоконвективной турбулентности во вращающейся жидкости: модельная сила, используемая в системе уравнений, моделирует спирально - вихревую неустойчивость [1]. Это позволяет на примере ламинарных течений смоделировать некоторые эффекты, которые могут возникнуть в турбулентных движениях.

Полученные результаты численного исследования нелинейной стадии развития спирально - вихревой неустойчивости в условиях твердых границ [2], в силу трудоемкости численной реализации позволили определить только узкий диапазон характерных параметров конвективных и спирально-конвективных движений.

Линейный анализ устойчивости этой задачи позволил получить спектр характеристических возмущений ламинарной конвекции в зависимости от интенсивности спирально-вихревой неустойчивости; определить критические значения числа Рэлея и построить нейтральные кривые для различных граничных условий.

Результаты работы являются широким дополнением к уже полученным ранее результатам и могут служить отправными условиями для изучения всего спектра движений возникающих в нелинейной постановке данной задачи для различного типа динамических граничных условий.

1. Levina G.V, Moiseev S.S., Rutkevich P.B. Hydrodynamic alpha-effect in a convective system // Advances in Fluid Mechanics. Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence / Ed. L. Debnath, D.N. Riahi. Southampton: WIT Press, 2000. V.2. P. 111-162.

2. Левина Г.В., Фирулев А.В., Шестакова Л.В. Численное моделирование эволюции спирально-вихревой неустойчивости в горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу. Изв. АН. Механика жидкости и газа. 2001, №4, С.13-24.

Большие перемещения упругих и упругопластических тел

А.Г. Хакимов (Уфа)

Целью работы является разработка методов и алгоритмов расчета трехмерных, осесимметричных и плоских задач упругопластического деформирования твердых тел, комплекса программ для осесимметичных и плоских задач динамического взаимодействия элементов конструкций и сред, разработка методов расчета больших перемещений гибких и мягких оболочек, гибких пространственных стержней.

Построены конечно - разностные уравнения типа Уилкинса для решения динамических трехмерных, осесимметричных и плоских задач с учетом теплопроводности при различных граничных условиях и решены различные задачи.

Получены уравнения движения гибких оболочек, исследовано обтекание гибких цилиндрических оболочек и пластинок плоским потоком идеальной несжимаемой жидкости.

Решены задачи взаимодействия мягких оболочек с потоком жидкости и газа, устойчивости течения вязкой несжимаемой жидкости с учетом сил поверхностного натяжения по круглой трубе с упругими стенками и по мягкой цилиндрической оболочке. Разработана методика расчета формы поперечного сечения гибких ограждений на основе мягких цилиндрических оболочек для аппаратов на воздушной подушке, мягких цилиндрических оболочек с заданными параметрами.

Получены уравнения движения гибких пространственных стержней; определена форма недеформированной рессоры равного сопротивления изгибу, которая под действием сосредоточенной силы становится прямолинейной; получено, что недеформированная рессора, изогнутая по дуге окружности, под действием сосредоточенной силы становится прямолинейной в следующих случаях: толщина рессоры прямоугольного сечения при постоянной ширине должна изменяться по кубической параболе, диаметр рессоры круглого поперечного сечения должен изменяться по параболе в четвертой степени.

Полученные теоретические результаты работы необходимо использовать при исследовании напряженно - деформированного состояния различных конструкций. Изменение конструкции гибкой рессоры глубинного скважинного профиломера на основе рекомендаций по результатам исследований позволили улучшить его характеристики. Рассмотрено равновесие технической колонны в наклонно направленной скважине. Такая задача возникает при проведении монтажных работ с целью определения максимальной длины технической колонны, которая может быть установлена под действием силы тяжести в пробуренной скважине; для определения нагрузки на крюке при подъеме бурильного инструмента из наклонно направленной скважины.

Динамика разрушения преград и конструкций при высокоскоростном внедрении техногенных тел

И.Е. Хорев (Томск)

В докладе анализируются результаты комплексного экспериментально - теоретического изучения разрушения преград и конструкций в сложной проблеме пространственного соударения твердых тел. Компьютерное моделирование проникающей и пробивной способности различных осколков проводилось модифицированным методом конечных элементов. В общем случае используемая модель динамического взаимодействия различных тел с конструкционными материалами описывается сжимаемой упругопластической средой. Поведение данной среды при ударных нагрузках характеризуется модулем сдвига, динамическим пределом текучести и константами кинетической модели разрушения, описывающей зарождение, рост и эволюцию микроповреждений, которые непрерывно изменяют локальные свойства материала и вызывают релаксацию напряжений. Компьютерным моделированием установлено и экспериментами подтверждено, что в случае проникания высокопрочных осколков наиболее эффективной защитой является монолитная преграда, обеспечивающая максимальное сопротивление внедряющемуся телу по сравнению с любой эквивалентной по весу разнесенной конструкцией. В случае проникания компактных деформирующихся осколков в монолитные эквивалентные и разнесенные конструкции показано, что наиболее эффективной защитой выступает двухпреградная разнесенная мишень. Это связано с тем, что разрушение первой и второй пластины происходит по существенно различным кинетическим механизмам. Аналогично установлено и выяснено, что в случае проникания в мишень деформирующегося осколка (стержня) с удлинением порядка 10 (отношения длины ударника к диаметру) наиболее стойкой выступает трехпреградная разнесенная конструкция по сравнению с монолитной и любой другой разнесенной. Обнаружено, что для стержней большого удлинения (порядка 20 и более) возникают новые физические особенности в процессе проникания в мишени, вызванных потерей продольной устойчивости таких осколков, что резко снижает их проникающую и пробивную способность. Обнаружено наличие критических удлинений стержневых ударников в зависимости от скорости встречи, при которых стержень теряет продольную устойчивость в процессе проникания. При ударе под углом осколков обнаружены особенности разрушения тыльной поверхности преград и шрапнельное действие фрагментов откольного эллипса на запреградную область. Предложены методы существенного ослабления шрапнельного эффекта в конструкциях, подверженных высокоскоростному прониканию техногенных тел.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-01-00766).

Метод решения задач с нелинейными законами фильтрации жидкости в трехмерных пластах с большим количеством гидродинамически несовершенных скважин

А.В. Цепаев (Казань)

Разработка эффективных алгоритмов решения трехмерных задач с большим числом скважин остается актуальной и сегодня. Необходимость сгущения сетки в прискважинных областях, а также использование нелинейных законов фильтрации приводят к нелинейным системам уравнений большой размерности. Фильтрационное течение, описываемое законом Дарси, выражает линейную зависимость между градиентом напора $grad\, h$ и вектором скорости фильтрации $\mathbf{v}$. В случае, когда значение числа Рейнольдса Re больше критического значения $\mathrm{Re}_{кр}$, закон Дарси нарушается, и фильтрационное течение описывается двучленным нелинейным законом Форхгеймера [1] $grad\, h = -(A + Bv)\mathbf{v}$, где $A = 1/K$, K - коэффициент фильтрации, v - модуль вектора скорости фильтрации $\mathbf{v}$, B - константы пористой среды.

Одним из развивающихся направлений решения подобных задач являются методы разделения области [2,3]. В работе предложен новый алгоритм согласования решений в прискважинных областях и решения во внескважинной области. Границы областей выполнения нелинейного закона фильтрации заранее неизвестны и определяются в процессе решения.

Подобный алгоритм для решения задач с линейными законами фильтрации был изложен в работе [4]. Предлагаемый алгоритм показывает превосходство в скорости по сравнению с решением системы уравнений без разделения области. Превосходство в скорости существенно возрастает с ростом количества скважин. Алгоритм разрабатывался для решения задач с использованием многопроцессорных компьютеров. В данной работе задачи решались без распараллеливания вычислений, однако распараллеливание процесса решения должно привести к более существенному выигрышу во времени.

1. Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.М., Максимов В.М. Подземная гидравлика.– М.:Недра, 1986, 303 с.

2. Марчук Г.Е.. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989, 121 с.

3. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1994, 528 с.

4. Мазуров П.А., Цепаев А.В. К решению задач фильтрации несжимаемой жидкости в трехмерных пластах с гидродинамически несовершенными скважинами. // Мат. моделир. 2002, т.14, №9,. с 121-123.

Влияние циклического нагружения на массобменные процессы в окрестности жесткого включения

А.В. Черепанов (Пермь)

Эластомерные материалы могут впитывать большое количество газа, который оказывает серьезное влияние на свойства материала. Материал создается под действием высокого давления и под давлением насыщается газом. После изготовления давление резко сбрасывается, теряется совместимость эластомера с растворенным газом, и газ начинает выходить как во внешнюю среду, так и в имеющиеся микродефекты. Эти эффекты ранее подробно исследовались нами. Однако реальные эластомерные материалы в чистом виде практически не используются в промышленности. Для придания им нужных механических свойств эластомерные материалы смешивают с жестким наполнителем. В процессе эксплуатации матрица может отходить от включения, в результате чего в образовавшуюся вакуоль начнет выделяться растворенный в эластомере газ. В случае циклического нагружения кривая нагрузки и разгрузки могут сильно отличаться, это приведет к тому, что в условиях циклического нагружения материал в окрестности дефекта начнет нагреваться, что необходимо учитывать при изучении механических свойств материала. Целью нашей работы является анализ этих явлений в строгой термодинамической постановке.

Рассмотрена задача изменения размеров вакуоли при циклическом нагружении в наполненном газом эластомерном материале. Исследовано влияние скорости нагружения на величину раскрытия вакуоли и разогрев материала вследствие диссипативных потерь. Для описания упругих свойства полимерной сетки использован потенциал, учитывающий конечность длин полимерных цепей.

Проведенные расчеты показали, что массообменные процессы могут оказывать существенное влияние на эволюцию материала в окрестности микродефекта. При циклическом нагружении может происходить разогрев материала за счет диссипативных процессов, существуют режимы, при которых разогрев наибольший. Влияние процессов, происходящих в окрестности включения, на концентрацию газа на удалении тем больше, чем меньше скорость нагрузки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96404).

Численное исследование устойчивости конвективного факела в зазоре между горизонтальными коаксиальными цилиндрами

В.И. Чернатынский (Пермь)

Экспериментальные исследования гравитационной конвекции в зазоре между горизонтальными коаксиальными цилиндрами [1,2] показали, что в достаточно больших зазорах при относительно больших значениях числа Прандтля с увеличением разности температур между цилиндрами формируется конвективный факел, который затем становится неустойчивым. Неустойчивость проявляется в распространении конвективных волн, а также отклонении факела от вертикали. Иными словами, имеет место спонтанная потеря симметрии течения. В данной работе проводится численное моделирование естественной конвекции в горизонтальном цилиндрическом слое на основе уравнений тепломассопереноса в приближении Буссинеска. Температуры ограничивающих поверхностей полагаются постоянными, причем температура внутреннего цилиндра выше, чем температура внешнего. В работах [1,2] отмечается отсутствие осевой структуры течения, поэтому, предполагается, что течение двумерно. Это позволяет использовать в качестве переменных задачи функцию тока и температуру. Для интегрирования уравнений конвекции в указанных переменных использовался метод конечных разностей. В качестве вспомогательной переменной использовалась завихренность течения. Различные режимы течения получались в результате установления по неявной конечно - разностной схеме продольно - поперечной прогонки. Для лучшего разрешения факела и пограничных слоев на внешнем и внутреннем цилиндрах использовались сетки с переменным шагом как по радиальной, так и по угловой координатам. Расчеты проводились для двух значений числа Прандтля P = 7, 15 в широком диапазоне значений числа Грасгофа. Толщина слоя была фиксирована и равна 0.7 радиуса внешнего цилиндра. Расчеты показали, что при P=7 с увеличением числа Грасгофа в пограничном слое на внутреннем цилиндре возникают волны, однако симметрия течению относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось системы, не нарушается. В случае P=15 развитие волн приводит к отклонению факела от вертикали. Проведено сопоставление данных расчета и эксперимента.

1. А.А. Иванова. Об устойчивости конвективного течения в слое между горизонтальными коаксиальными цилиндрами./ Конвективные течения. Сб. научн. трудов. Пермь: ПГПИ, 1987, с. 25-33.

2. А.А. Иванова. Структура вибрационно-гравитационного конвективного течения в цилиндрическом слое./ Вибрационные эффекты в гидродинамике: Сб. статей/ Перм. ун-т. – Пермь, 1998, с.142-165.

Термокапиллярная конвекция в квадратной области при наличии мениска

В.И. Чернатынский (Пермь)

Исследование конвекции Марангони в кювете, имеющей форму параллелепипеда квадратного сечения, результаты которого представлены в [1], показало, что с увеличением разности температур на свободной поверхности течение становится колебательным. Было обнаружено, что существует несколько колебательных режимов, связанных с разными возможными механизмами неустойчивости течения. В частности, был обнаружен колебательный режим, связанный с формированием вихревой структуры течения в области мениска вблизи холодной стенки. В работе [2] для численного моделирования конвекции в пристеночной области использовалась полость треугольного сечения. Были обнаружены колебательные режимы, которым предшествовало образование вихрей. Показано, что формирование вихревой структуры течения происходит эволюционным путем, в то время как колебания возникают в результате кризиса течения. В данной работе проведено численное исследование двумерной конвекции Марангони в полости квадратного сечения. Боковые стенки полагаются изотермическими. Дно и свободная поверхность жидкости полагаются теплоизолированными. Свободная поверхность имеет форму мениска. Коэффициент поверхностного натяжения считается линейной функцией температуры. Уравнения термокапиллярной конвекции были записаны в системе координат, отображающих область сложной формы на квадрат [3]. Для численного интегрирования полученной системы уравнений использовался метод конечных разностей. Различные режимы течения получались в результате установления по явной двуслойной конечно - разностной схеме. Расчеты проведены как на равномерных, так и на неравномерных сетках, сгущающихся у холодной границы, при значении числа Прандтля, равном 17 (этанол) для менисков с разными краевыми углами. Подтверждено формирование вихревого течения, предшествующего возникновению колебательных режимов. Проведено сравнение результатов с предыдущими исследованиями.

1. C. Bach. Resonanz von Oberflächenwellen mit thermocapillaren Instabilitäten in einem Meniskus. Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgardes der Naturwissenschaften der Justus-Liebig-Universität Giessen. I. Physikalisches Institut der Justus-Liebig-Universität Giessen. 2000.

2. Бах Х., Чернатынский В.И., Швабе Д. Численное исследование термокапиллярной конвекции в области мениска (в печати).

3. M. Hamed, J. M. Florian. Marangoni convection. Part 1. A cavity with differentially heated sidewalls. J. Fluid Mech. (2000), vol. 405, pp. 79-110.

Морфология разрушения, вызываемого реакцией ионного обмена в силикатном стекле

С.А. Чижик (Новосибирск)

Большинство твердофазных химических реакций приводит к изменению объема твердых реагентов, что приводит к возникновению полей механических напряжений, пространственно связанных с зоной протекания реакции. Дефекты, образующиеся в ходе релаксации возникающих напряжений, изменяют химико - физические свойства реагента и существенно влияют на кинетику и пространственное развитие реакции – между реакцией и релаксацией устанавливается обратная связь, и эти процессы начинают протекать самосогласованно. Одним из наиболее характерных механизмов релаксации, наблюдаемых при твердофазных реакциях, является разрушение. Новая поверхность, образующаяся при разрушении, приводит к локальному ускорению гетерогенных реакций, в результате чего формируется совместный фронт реакции и разрушения. Наиболее сложной частью описания подобных процессов является описание морфологии разрушения - формы фрагментов или геометрии сетки трещин. При протекании реакции в кристаллических реагентах разрушение, как правило, происходит по выделенным системам плоскостей (плоскости спайности). Однако если реакция протекает в изотропном реагенте, то характерная геометрия образующейся сетки трещин не определена и может меняться, в зависимости от конкретных условий. Подобная ситуация была экспериментально изучена на примере реакции натрий литиевого ионного обмена в щелочно-силикатном стекле, протекающей в литийсодержащих солевых расплавах. Установлено, что при проведении реакции в расплавах различных составов может реализоваться как неупорядоченная, так и упорядоченная морфология разрушения – система параллельных шестигранных стержней расположенных по нормали к распространению фронта. При проведении реакции в серии смешанных расплавов был выяснен механизм перехода порядок - беспорядок. Данный переход обусловлен постепенно нарастающей потерей устойчивости прямолинейного распространения трещин, приводящей к периодическим колебаниям их траекторий и образованию упорядоченной системы гофрированных стержней. Постепенное нарастание амплитуды колебаний приводит к потере корреляции и переходу к неупорядоченной морфологии. В результате исследований были установлены факторы, определяющие устойчивость реализующихся морфологий и построена количественная модель совместного фронта реакции и разрушения. Предложенная модель позволяет весьма точно описать качественные и количественные характеристики наблюдаемого фронта разрушения, пределы устойчивости упорядоченной морфологии и механизм перехода порядок-беспорядок для исследованного процесса.

Численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в кровеносной системе

А.В. Чичиндаев (Новосибирск)

Одним из эффективных способов исследования действия на человека экстремальных факторов является численное моделирование физических процессов в организме. В этом случае можно резко сократить дорогостоящие и опасные экспериментальные исследования. Вместе с тем количество работ в этой области в настоящий момент ограниченно, либо применяются упрощённые модели расчёта. Целью настоящей работы является изложение результатов исследований, выполненных с помощью разработанной на кафедре Техническая теплофизика НГТУ модели расчёта гемодинамики кровеносной системы и системы терморегуляции человека.

В основе модели расчёта лежит численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена эквивалентной гидравлической схемы большого круга кровообращения, учитывающей не только основных потребителей артериальной крови, но и особенности включения потребителей в последовательно - параллельную цепь. Исходная математическая модель расчета расходно-напорных характеристик эквивалентной гидравлической системы представляет систему уравнений Бернулли, составленную для пяти характерных групп потребителей: 1 - голова, 2 - руки, 3 - миокард, 4 - мышцы туловища и внутренние органы, 5 - мышцы ног. Распределение кровотока в группе потребителей 4 описывалось с помощью дополнительной системы из 6 линейных уравнений, предназначенных для определения кровотока по органам и тканям туловища. Завершающая часть модели расчёта представляет собой систему уравнений теплового баланса, описывающую особенности теплообмена тканей организма с окружающей средой. В качестве исходных данных используется широкий круг внешних физических факторов (температура, давление, инерционные нагрузки, положение тела и т.д.), а также морфологические свойства организма и крови.

Численное исследование по разработанной модели проведено для следующих вариантов задач. Гидродинамические: особенности влияния на работу кровеносной системы умеренных стационарных линейных ускорений в диапазоне α = -10 ... 0 ... +10 g для трех базовых положений тела: стоя, сидя, лежа, а также особенности воздействия невесомости и гиподинамии. Тепловые: особенности тепловой нагрузки на ткани организма в нестационарных условиях при воздушной гипотермии и гипертермии в диапазоне температур t = - 50 … + 100 ^{0}C, а также водной гипотермии в диапазоне t = 0 … 20 ^{0}C. Результаты расчетов качественно и количественно согласуются с известными физиологическими данными и дают представление о локальных особенностях гидродинамики и теплообмена в организме человека.

Экспериментальное исследование тиксотропных свойств наполненных полимеров

В.В. Шадрин (Пермь)

Кривые нагружения наполненных эластомерных материалов характеризуются ярко выраженной нелинейностью и зависимостью свойств от истории нагружения. После первого нагружения резин происходит размягчение материала. Оно заключается в уменьшении упругого сопротивления при повторном деформировании до деформаций, меньших максимальной деформации в предыдущем нагружении. Часто эффект размягчения связывают с ростом поврежденности материала и моделируют введением параметра повреждаемости. Однако повреждаемость не объясняет восстановления свойств в результате длительного отдыха или термостатирования материала - это наблюдается в эксперименте. Структурные изменения в результате растяжения можно объяснить тиксотропными свойствами эластомера.

Тиксотропия состоит в восстановлении первоначальных свойств со временем или при термостатировании материала после деформации. В наполненных системах тиксотропия может быть вызвана изменениями надмолекулярной структуры эластомера, изменениями морфологии эластомерной сетки при деформировании и восстановлении ее при отдыхе, разрушением и восстановлением физических контактов между частицами наполнителя, образующими пространственную структуру. Если под действием внешней нагрузки в материале на молекулярном уровне происходит затягивание петель в полимерных цепях, скольжение и отрыв цепей от частиц наполнителя, то в случае снятия внешней нагрузки происходит ослабление петель, наползание или налипание цепей на включения. При этом кинетической энергии движения звеньев полимерных цепей недостаточно для того, чтобы обратный процесс восстановления шел с такими же скоростями, что и при нагружении. Петли, затянутые в очень тугие узлы, долго не могут распутаться, формирование исходной морфологии полимерной сетки идет медленно. При термостатировании процесс ускоряется.

В работе приведены графики циклического растяжения образцов из резины и диаграммы растяжения образцов после отдыха и термостатирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02-01-96404).

Моделирование распространения примеси в пограничном слое атмосферы от холодного источника большой мощности

К.Г. Шварц, В.А. Шкляев (Пермь)

Одной из актуальных задач охраны окружающей среды является математическое моделирование чрезвычайных техногенных ситуаций, в результате которых возникают локальные неизотермические процессы в нижнем слое атмосферы. Учитывая сложность моделирования таких задач и большую вычислительную трудоемкость, довольно часто используются двумерные модели, сохраняющие основные физические механизмы изучаемых процессов. В данной работе предлагается подобная модель, вывод которой основан на известном подходе [1], успешно применяемом в геофизических приложениях. В качестве исходных были выбраны трехмерные уравнения гидротермодинамики “сухой” турбулентной атмосферы и уравнение переноса примеси в декартовой системе с учетом “двойного диффузионного” механизма [2]. Нижний слой атмосферы считался несжимаемым газом, использовалось приближение Буссинеска, статика и крупномасштабность.

Источником примеси является жидкость, разлитая на земной поверхности в результате техногенной аварии, например, жидкий аммиак. Примесь, распространяемая в пограничном слое атмосферы, как и разлитая жидкость, является концентрационным источником холода.

Были получены эволюционное уравнение для вихря скорости, безразмерной потенциальной температуры и концентрации примеси. В них появляются слагаемые, обусловленные нелинейными механизмами завихренности и термодиффузии.

Численные эксперименты проводились для различных погодных условий. Были получены поля концентрации примеси, температуры и функции тока.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант № 02-05-96401).

1. Аристов С.Н., Фрик П.Г. Крупномасштабная турбулентность в тонком слое неизотермической вращающейся жидкости // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа, 1988, №4, с.48-55.

2. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. – М. Наука, 1989. – 320с.

Длинноволновая неустойчивость Марангони при неоднородном нагреве

В.П. Шилов (Пермь)

Важное место в экспериментальных исследованиях конвекции Марангони занимают течения, возникающие при неоднородном нагреве (или неоднородном внесении ПАВ). Такие движения жидкости мало изучены, и многие обнаруженные эффекты [1, 2] до сих пор не получили адекватного объяснения. В работе теоретически исследуется слабонадкритическая конвекция Марангони в слое жидкости со свободной деформируемой верхней границей и неоднородным источником тепла. В длинноволновом приближении получена система двумерных нелинейных уравнений для амплитуд возмущений температуры, завихренности и деформации свободной поверхности, обобщаюшая уравнения работы [3]. Рассмотрен плоский и осесимметричный варианты неоднородности теплопотока, определены границы устойчивости конвективных режимов на плоскости параметров, характеризующих превышение критического теплопотока внутри пятна и глубину демпфирования вне его, при различных значениях чисел капиллярного и Галилея. Для осесимметричного пятна определены области устойчивости возмущений с различными значениями азимутального числа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 02 - 01 – 96407) и Американского фонда гражданских исследований и развития (грант № РЕ-009-0).

1. Пшеничников А.Ф., Яценко С.С., Конвективная диффузия от сосредоточенного источника поверхностно-активного вещества// Гидродинамика. 1974. № 33, ПГУ, Пермь.

2. Братухин Ю.К., Макаров С.О., Мизёв А.И., Колебательные режимы термокапиллярной конвекции от сосредоточенного источника тепла// Изв. РАН, МЖГ. 2000. № 2. С. 92 - 103.

3. Golovin A.A., Nepomnyashchy A.A., Pismen L.M., Pattern formation in large-scale Marangoni convection with deformable interface// Physica D. 1995. V, 81. P. 117 - 147.

Численное моделирование трехмерных газодинамических течений с помощью иерархических динамически адаптивных сеток

М.А. Шубин (Челябинск)

При моделировании трехмерных газоводинамических течений практически единственным способом введения динамически адаптивной сетки является использование иерархических динамически адаптивных сеток (AMR, Adaptive Mesh Refinement) [1,2]. Другие методы адаптации в трехмерном случае становятся слишком сложными и громоздкими. Применение иерархических динамически адаптивных сеток позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы в задачах моделирования течений с сильно изменяющимися в пределах расчетной области пространственными и временными масштабами (большие градиенты и быстрые временные вариации). Технология AMR основана на использовании иерархической структуры ячеек (подсеток). При этом каждому уровню иерархии соответствует свой уровень пространственного и временного разрешения. Особенностью такой организации расчетных ячеек является возможность локально динамическим образом добавлять или удалять ячейки из сетки в зависимости от сложности картины течения в данной точке расчетной области в данный момент времени. В результате расчетная сетка автоматически приспосабливается к моделированию конкретного течения с адекватным пространственным и временным разрешением. Применение AMR позволяет уменьшить общее число расчетных ячеек и, соответственно, время расчета без существенного ухудшения точности численного решения.

В данной работе построена иерархическая динамически адаптивная сетка для моделирования многомерных (двух- или трехмерных) газодинамических течений. Представлены результаты тестовых расчетов свободной аккреции и задачи о сильном взрыве.

1. Berger M.J., Colella P., 1989, J. Comput.Phys., V.82, p. 64-84.

2. Khokhlov A.M., 1998, J.Comput. Phys., V.143, p.519-543.

Термокапиллярная неустойчивость в слое с внутренним тепловыделением с реалистичными граничными условиями для температуры

В.И. Якушин (Пермь)

Исследуется термокапиллярная неусточивость плоского слоя бинарной смеси, одна из компонент которой обуславливает внутреннее тепловыделение, ограниченного свободной и твердой поверхностями в условиях невесомости. Физические механизмы тепловыделения могут быть различными: джоулева диссипация, химические реакции, поглощение внешнего излучения и другие.

В работе рассмотрены две постановки задачи: 1) в процессе тепловыделения концентрация тепловыделяющей компоненты не изменяется; 2) тепловыделение приводит к пропорциональному уменьшению концентрации активной компоненты, что соответствует химической реакции первого порядка.

Ещё одной особенностью работы является использование реалистичных условий для температуры на свободной поверхности. Заметим, что обычно в работах по линейной теории термокапиллярной устойчивости равновесный градиент температуры находится для изотермической границы, а ньютоновское условие теплоотдачи используется только при определении возмущений. Такая постановка задачи устойчивости может существенно изменить значения критических параметров системы и затруднить сравнение линейной теории с результатами нелинейного анализа.

Система уравнений конвекции смеси включает уравнения переноса импульса, теплопроводности и диффузии. Наличие концентрационных источников тепла приводит к появлению в уравнении теплопроводности источникового члена, пропорционального концентрации, а их убыль описывается аналогичным слагаемым в уравнении диффузии. Поверхностное натяжение предполагается зависящим только от температуры. Свободная поверхность считалась недеформируемой. Твердая граница рассматривалась как а) теплоизолированная или б) изотермическая.

Методом Рунге-Кутты построены нейтральные кривые, зависимости критических чисел Марангони от числа Био для характерных значений числа Льюиса и параметра «выгорания», структуры возникающих конвективных движений. Обнаружено значительное понижение устойчивости системы с уменьшением числа Льюиса. Для слоя с изотермической твердой границей зависимость числа Марангони от числа Био не монотонна: наименьшее пороговое значение числа Марангони достигается для не нулевого числа Био; неустойчивость в такой системе возможна как для положительных, так и для отрицательных чисел Марангони.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-01-00614).

Структурно–феноменологическая модель роста усталостной трещины в порошковых металлокомпозитах

Е.М. Якушина (Пермь)

Порошковая технология позволяет значительно расширить область получения дисперсных тел с принципиально новыми свойствами, использование которых выводит технику на более высокий уровень. Вместе с тем, обладая рядом преимуществ по сравнению с литыми металлами и сплавами, спеченные порошковые материалы, как правило, обладают склонностью к хрупкому разрушению и низкой способностью сопротивляться распространению трещины. В связи с этим, возникает необходимость в комплексном изучении причин появления и условий развития трещин, а также факторов, влияющих на долговечность конструкций.

Для оценки сопротивления материала усталостной трещине проводились испытания образцов спеченных порошковых металлокомпозитов на основе железа и порошкового титанового сплава на основе механизированной титановой губки. Визуальное наблюдение микроструктуры порошковых материалов осуществлялось с помощью микроскопа металлографического агрегатного серии ЕС МЕТАМ РВ и микроскопа стереоскопического МБС–9. Выявлены общие закономерности и особенности механизма роста трещины в режиме многоциклового нагружения в спеченных порошковых материалах с различной структурой.

Структурно - феноменологический подход, который в данной работе являлся основой для моделирования процесса роста усталостной трещины, позволяет рассматривать процессы усталостного разрушения как на макроуровне, отражающего поведение материала как однородного, так и на микроуровне, учитывающего особенности структурного строения порошковых сталей. Математическое описание микроструктуры производилось в результате обработки изображения структуры материала, полученное с использованием проекционного сканера ScanNex II. Аппарат теории случайных функций, используемый для описания неоднородной микроструктуры порошкового материала, позволяет определить локальные параметры разрушения для элементарного объема, окружающего вершину усталостной трещины.

Практическое значение имеют представленные в работе параметры циклической трещиностойкости, которые не только уточняют для исследуемых материалов параметры циклической трещиностойкости, но и могут быть использованы для прогнозирования поведения элементов конструкций, для назначения безопасных режимов эксплуатации при циклическом нагружении.

О возможностях описания разномодульной упругой среды с использованием кусочно-линейных потенциалов

В.М. Ярушина (Владивосток)

Известно, что ряд материалов (среды с микронарушениями сплошности) имеет разные диаграммы “напряжение-деформация” при действии на них сжимающей нагрузки и растягивающей, что совершенно игнорируется классической теорией упругости. Попытки описания подобного эффекта были предприняты в [1], где предложен особый упругий потенциал с сингулярностью в нулевой точке пространства деформаций. Настоящее сообщение посвящено совершенно иному подходу к описанию разномодульной упругой среды, связанному с обобщением теории упругости при кусочно-линейных потенциалах [2]. Данная теория строится в предположении малости деформаций изотропной среды, в силу чего имеет место следующий вид потенциальной зависимости деформаций e_{ij} от напряжений σ_{ij}.

$$e_{ij} = \frac{\partial U(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}, \; U(\sigma_{ij}) = U_1(\sigma) + U_2(\Sigma), \qquad (1),$$

где $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$, Σ - некоторая однородная первой степени функция тензора напряжений, U_1, U_2 - некоторые экспериментальные функции. Если отказаться от условия нормальной изотропности среды, принятого в [2], то тем самым мы определим среду, по-разному сопротивляющуюся растяжению и сжатию. Отказ от нормальной изотропии приводит только к изменению функции Σ, которая, в частности, может быть задана следующим образом:

$$\Sigma = \max |S_i - \beta S_j| . \qquad (2).$$

Здесь β - постоянная материала, определяющая различие модулей упругости при растяжении и сжатии, S_i - главные значения девиатора напряжений. Функция (2) является обобщением функции Треска $\Sigma = \max |\sigma_i - \sigma_j|$. Последняя является частным случаем (2) при $\beta = 1$.

1. Мясников В.П., Олейников А. И. Основные общие соотношения модели изотропно-упругой разносопротивляющейся среды // Докл. АНСССР. 1992. Т. 322 №1. с. 57-60.

2. Быковцев Г.И. Общие свойства уравнений теории упругости при кусочно-линейных потенциалах // ПММ.1996.Т.60,№3.с.505-515.

Высокоэластичные композиционные материалы на основе углеграфитового волокна

Н.Е. Яханова (Уфа)

Изучены упругие свойства композиционных материалов (КМ) на основе трикотажного переплетения из углеграфитового волокна, которое обладает высокой эластичностью, а изделия из него – способностью к быстрому восстановлению формы при снятии деформации. В модели предполагается, что существует нейтральная ось, такая, что каждый элемент нити, лежащий на этой оси не удлиняется, и не укорачивается, а только изгибается. Плоские сечения, перпендикулярные к нейтральной оси нити в начальном недеформированном состоянии и после изгиба остаются плоскими и перпендикулярными ей.

Эти условия соблюдаются, когда перемещения, деформации и напряжения имеют цилиндрическую симметрию. Тогда для вектора перемещения w можно полагать

$$w_1 = w(r), \quad w_2 = w_3 = 0.$$

При этом из решения уравнения состояния материала при нагрузке следует, что относительная деформация имеет вид

$$w = Ar + \frac{B}{r},$$

т.е. при малых радиусах петель основы КМ деформация растет как *1/r*. Сделаны теоретические оценки упругого модуля композиционного материала, которые выше упругих модулей составляющих компонент. При динамической нагрузке КМ следует учесть внутреннее трение, которое возникает из-за скольжения нитей друг по другу. Феноменологическое описание эффектов трения можно проверить с учетом скоростей деформации $\partial w/\partial t$ и путем введения коэффициента внутренней вязкости λ. Изучены различные варианты динамической нагрузки материала и проведено компьютерное моделирование деформации с учетом этого.