



НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова
Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



3–12 сентября 2021
СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ





НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ***

посвященная 60-летию первого полета человека в космос

***3–12 СЕНТЯБРЯ 2021
СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ***

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 531/534

ББК 22.2

В 84

Ответственные редакторы:
А.А. Афанасьев, М.С. Макарова

Составители: О.О. Иванов, А.М. Чайка

В84 Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2021, посвященная 60-летию первого полета человека в космос. Тезисы докладов (3 – 12 сентября 2021 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2021. – 161 с. – (Электронное издание сетевого распространения).

ISBN 978-5-19-011642-7 (e-book)

Проведение Всероссийской конференции молодых учёных-механиков направлено на поддержание высокого уровня фундаментальных и прикладных исследований молодых ученых, сохранения и развития научных школ и преемственности поколений в ведущих научных коллективах и генерирования инновационных идей. Цель конференции – сделать молодых учёных более коммуникабельными, расширить их научный кругозор, наладить научные связи между учёными из различных университетов, институтов и профильных научных организаций страны. Тематика конференции охватывает все направления механики, в том числе такие направления как механика жидкости и газа, механика деформируемого твёрдого тела, теоретическая механика, мехатроника и робототехника. Данный сборник содержит тезисы докладов в редакции участников конференции.

Конференция проводится при финансовой поддержке НЦМУ "Сверхзвук".

УДК 531/534
ББК 22.2

ISBN 978-5-19-011642-7 (e-book)

© Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова, 2021

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова,
Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ

И.Г. Горячева – Сопредседатель Научного комитета (ИПмех РАН, Москва)

Ю.М. Окунев – Сопредседатель Научного комитета (МГУ, Москва)

Члены Научного комитета

В.Л. Бердичевский (Wayne State University, США); А.Ю. Вараксин (МГТУ, Москва);
Ю.В. Василевский (ИВМ РАН, Москва); Ю.Ф. Голубев (МГУ, Москва); А.В. Дедов (МЭИ,
Москва); О.Э. Мельник (МГУ, Москва); Н.В. Никитин (МГУ, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Совет молодых ученых НИИ механики МГУ: А.А. Афанасьев (председатель Организационного комитета); М.С. Макарова (ученый секретарь Организационного комитета); А.М. Чайка (ответственный секретарь Организационного комитета); В.В. Веденеев; Ю.С. Зайко; О.О. Иванов; Е.А. Коровайцева; Б.И. Краснопольский; С.С. Попович, Ф.А. Семин; О.Г. Сутырин; В.В. Терауд

СОДЕРЖАНИЕ

А.Ю. Вараксин МЕХАНИКА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ: ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ	13
Ю.В. Василевский ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЖИДКОСТИ И БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ	14
Ю.Ф. Голубев ИСТОРИЯ ПОДГОТОВКИ ПОЛЕТА Ю.А. ГАГАРИНА	15
И.Г. Горячева МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ С МЯГКИМИ БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ	16
А.В. Дедов ОСОБЕННОСТИ КИПЕНИЯ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ	17
О.Э. Мельник, И.С. Уткин ДИНАМИКА ВУЛКНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	18
Н.В. Никитин МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРАНДТЛЯ 2 РОДА	19
К.Э. Абдульманов, Н.В. Никитин ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ	20
Ф.А. Абдухакимов, В.В. Веденеев ФЛАТТЕР ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НЕНУЛЕВОМ УГЛЕ СКОЛЬЖЕНИЯ	21
И.И. Вигдорович, А.И. Агеев, Т.А. Манаенкова ЗАКОНЫ СТЕНКИ ДЛЯ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	22
И.В. Алпатов МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОГО РЕБРА	23
И.А. Амелюшкин, А.Л. Стасенко МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ КАПЕЛЬ С РЕЛЬЕФНЫМ ТЕЛОМ В ПОТОКЕ ГАЗА	24
А. И. Андреева, А.А. Афанасьев ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОХВАТА НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ	25
М.С. Астанина, М.А. Шеремет МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПОРИСТОЙ КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОЙ ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ	26
А.А. Афанасьев МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЧКИ СО ₂ В ПОДЗЕМНОЕ ХРАНИЛИЩЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА	27
А.Ж. Ахметов, И.Ю. Смолин АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	28
Д. А. Ашуров ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ НАД МОНОЛИТНЫМ ПОДАТЛИВЫМ ПОКРЫТИЕМ	29
Н.С. Белоусова, О.Г. Глотов, А.В. Гуськов ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА ПРИ ГОРЕНИИ	30

Д.Е. Бесчеров, М.Н. Ереев, А.С. Марков, В.А. Панов, Д.Н. Свешников РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	31
Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ДВУХОПОРНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ	32
Д.В. Бордюгов, Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВИБРАЦИОННЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ	33
А.И. Брызгалов, С.Е. Якуш, А.Ф. Колесников ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПЛАЗМЫ	34
Н.В. Вазаева, О.Г. Чхетиани ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	35
Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко, К.С. Пьянков, Н.И. Тилляева К ЧИСЛЕННОМУ ИНТЕГРИРОВАНИЮ УРАВНЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ О ЗВУКОВОМ УДАРЕ	36
С.А. Вальгер ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В ОКРЕСТНОСТИ ГОРОДСКОГО КАНЬОНА	37
И.А. Варьян, Н.Н. Колесникова, А.А. Попов РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА	38
Я.А. Вахтерова, Г.В. Федотенков ОБРАТНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧЕНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ	39
В.В. Веденеев АБСОЛЮТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЯХ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	40
Г.С. Ганченко, М.С. Алексеев КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ МАКРОМОЛЕКУЛ И НАНОЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ ОКОЛО ИОНΟΣЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛЫ	41
Г.С. Ганченко, В.А. Попов, Р.Р. Пономарев, Е.А. Демехин ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ВЯЗКОЭЛАСТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ	42
М.А. Гарбуз ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ СТОПОХОДЯЩЕЙ МАШИНЫ С ВЕТРОПРИВОДОМ	43
Л.Р. Гареев, В.В. Веденеев, Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, В.В. Трифонов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДАЛЬНОЙ И АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА	44
С.А. Голованов ПОДВОДНЫЙ КАПСУЛЬНЫЙ РОБОТ, УПРАВЛЯЕМЫЙ ДВИЖЕНИЕМ ОДНОГО МАХОВИКА	45
А.В. Бойко, А.П. Голуб, В.А. Ерошин ДВИЖЕНИЕ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ ПО ВОДЕ	46

И.В. Голубкина, А.Н. Осипцов РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ АДИАБАТИЧЕСКОЙ СТЕНКИ, ОБТЕКАЕМОЙ СВЕРХЗВУКОВЫМ РАСШИРЯЮЩИМСЯ ГАЗОКАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ	47
В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, И.В. Гордеева ГРАНИЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН	48
Н.В. Горохова СТАЦИОНАРНОЕ ИСТЕЧЕНИЕ СМЕСИ ГАЗ-ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ ИЗ ПЛОСКОГО КАНАЛА	49
Н.В. Горохова МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СМЕСИ ГАЗ - ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ	50
Ж.В. Гудкина, М.Ю. Гуткин, С.А. Красницкий РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ДИЛАТАЦИОННОЙ НИТИ В УПРУГОМ КЛИНЕ	51
Ж.В. Гудкина, М.Ю. Гуткин, Т.С. Аргунова РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА В ДЕНТИНЕ	52
Г.В. Гусак МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ МЕЖДУ КОЛЕСОМ И ДОРОГОЙ	53
И.А. Аганин, А.И. Давлетшин ДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В СФЕРИЧЕСКОМ КЛАСТЕРЕ ПРИ МГНОВЕННОМ ПОВЫШЕНИИ ИХ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ	54
Ю.С. Дементьева, В.С. Кобелева, В.Г. Козлов УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ	55
М.Н. Кравченко, Н.Н. Диева, Е.Г. Разбегина, А.Д. Малова МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ С УЧЕТОМ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЗАКАЧИВАЕМОГО АКТИВНОГО СОСТАВА	56
Е.А. Ефимов ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕЙСМОИСТОЧНИКА НА ГРУНТ	57
В.А. Жигарев, А.Л. Неверов, А.В. Матвеев РАЗРАБОТКА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН	58
Ю.С. Зайко, А.А. Спасова РАЗРАБОТКА АГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА, ФОРМИРУЮЩЕГО СТРУЮ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ	59
О.К. Зайченко, В.М. Кац, В.А. Морозов РАСЧЕТ ПРОФИЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПММА, ИНИЦИИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКОВ	60
Н.А. Зверев, А.В. Земсков РЕШЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНОДИФфуЗИИ ДЛЯ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФфуЗИОННЫХ ПОТОКОВ	61
Е.В. Зинькевич МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ПРИСУТСТВИИ УПРУГОГО ФЛЮИДА В ПЛАСТАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ	62
Зо Аунг, С.О. Гладков О ВОЗМОЖНЫХ ПОПРАВКАХ К УРАВНЕНИЮ НАВЬЕ-СТОКСА ПО ЧИСЛУ КНУДСЕНА	63

А.Н. Зотова, А.А. Зобова КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТОРМОЖЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО УПРУГОГО ЦИЛИНДРА НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ	64
О.О. Иванов, В.В. Веденеев ОБ УСИЛЕНИИ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ВБЛИЗИ ПЛАСТИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ	65
А.Ю. Ильиных ДИСКРЕТНЫЕ СТРУКТУРЫ ИМПАКТА КАПЛИ	66
А.Ю. Ильиных БРЫЗГИ ИМПАКТА КАПЛИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ПЛОТНОСТЯХ ЖИДКОСТЕЙ	67
А.А. Каменских, А.П. Панькова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ТРЕХМЕРНОЕ ФРИКЦИОННОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ	68
А.А. Каменских, В.И. Струкова АНАЛИЗ РАБОТЫ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ	69
Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, А.А. Каменских О ВЛИЯНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩЕГО МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКНА ТИПА PANDA	70
Р.В. Кароткян ИССЛЕДОВАНИЕ ТКАНЕЙ ГЛАЗА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ	71
О.В. Матвиенко, Д.П. Касымов, Е.Л. Лобода, А.В. Луценко ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	72
О.К. Зайченко, В.М. Кац, В.А. Морозов ЛАБОРАТОРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ, ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	73
М.А. Кирюшина, Д.А. Рязанов МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ В OPENFOAM® V2012	74
В.С. Кобелева, Ю.С. Дементьева, В.Г. Козлов ДИНАМИКА МНОГОФАЗНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛОСТЯХ	75
М.В. Козлов, Т.П. Любимова, К.А. Рыбкин, М.О. Кучинский, О.О. Фатталов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ПАРОГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА НА ПОВЕРХНОСТИ АКРИЛА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ NACL И ПАВ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	76
С. В. Козлова, И. И. Рыжков, М. М. Боу-Али МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ С АНОМАЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ СОРЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ КОЛОННЕ	77
А.А. Колесова, Е.Г. Колесова, М.Н. Жорник, С.В. Веретенников ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНКИ ОХЛАДИТЕЛЯ ПРИ ВДУВЕ В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК	78
В.С. Корниенко МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВЛЕНИЯ ОРИНЕТАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ ПАРЫ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	79

Е.А. Коровайцева ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ В РЕШЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	80
С.Д. Корольков, В.В. Измоленов ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КНУДСЕНА НА АСТРОСФЕРЫ: ОТ СВОБОДНО-МОЛЕКУЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ ДО СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	81
П. А. Моссаковский, Л. А. Костырева, И. В. Инюхин, О.П. Королькова О НОВЫХ ПОДХОДАХ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	82
М.В. Кочергин, А.Г. Кучумов БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В АОРТЕ ЧЕРЕЗ ТРЕХСТВОРЧАТЫЙ АОРТАЛЬНЫЙ КЛАПАН С УЧЕТОМ ДВУСТОРОННЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА	83
А.И. Кром, И.И. Рыжков МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕМБРАН С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	84
А.Э. Курбанов ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЭФФЕКТ ГАЛОПИРОВАНИЯ	85
М.О. Кучинский, Т.П. Любимова, О.О. Фатгалов, К.А. Рыбкин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ	86
Ю.О. Куянова, А.В. Дубовой, А.В. Бервицкий, Д.В. Паршин ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ В ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТА ФОРМИРОВАНИЯ ОБХОДНОГО СОСУДИСТОГО АНАСТОМОЗА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСУДИСТОЙ СЕТИ	87
А.А. Легкий, В.Ю. Саламатова ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГИПЕРУПРУГИХ УЗЛОВЫХ СИЛ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОАПТАЦИИ СТВОРОК МОДЕЛИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА: ОБОЛОЧЕЧНАЯ ФОРМУЛИРОВКА ПРОТИВ МЕМБРАННОЙ	88
А.С. Леднов, И.О. Харчевников, А.Л. Николаев ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ИНДЕНТОРОВ ДЛЯ NANOTEST 600, ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ	89
А. Липовка, Д. Паршин, А. Карпенко ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ АОРТЫ С ПАТОЛОГИЯМИ	90
О. А. Логвинов НЕНЬЮТОНОВСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ХЕЛЕ-ШОУ	91
Д.С. Лоенко, М.А. Шеремет ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ НАНОЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ	92
К.А. Лонин, С.А. Малкин, В.А. Панов, В.Л. Патрушев, Д.В. Савчук, С.А. Соловьев КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ГИБКОГО РОТОРА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ	93
А.И. Лопато, А.Г. Еременко МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ СХЕМ	94
А.В. Лыкова, А.В. Ильиных ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ	95

ДЕЙСТВИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОЙ ВЕЛИЧИНЫ	
Е.П. Магденко О ТРЁХМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ	96
А.В. Мазаев ПРОЧНОСТЬ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН С ТЕТРАКИРАЛЬНЫМИ СОТАМИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ	97
В.Г. Лущик, М.С. Макарова ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С УМЕРЕННЫМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ	98
В.Г. Лущик, М.С. Макарова ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ПРЕДОТРЫВНЫМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ	99
А.И. Леонтьев, В.Г. Лущик, М.С. Макарова, С.С. Попович ОБЗОР ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЖИМАЕМОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	100
Е.А. Малиновская, О.Г. Чхетиани ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭОЛОВОГО РЕЛЬЕФА НА ВЕТРОВЫЕ УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ	101
Е.А. Малиновская, Д.Р. Малиновский УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ МИКРОПОТОКОВ БЛИЗИ ПЕСЧАНОЙ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ	102
А.Р. Мещерякова, И.Г. Горячева НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	103
С.А. Михайленко, М.А. Шеремет ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ И ПОВЕРХНОСТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ОБОГРЕВАЕМОЙ КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ	104
А.В. Мишин ОБОБЩЕННАЯ ПРОИЗВОДНАЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УЧЕТА МИКРОСТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ	105
И.Н. Солдатов, З.П. Мишустова ВОЛНОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	106
В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Д.А. Мищенко СТАТИСТИЧЕСКИ-ДОСТОВЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА МОДЕЛИ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	107
М.Н. Муллахметов, А.В. Ильиных МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ	108
М.А. Муницына ДИНАМИКА ВОЛЧКА ТИП-ТОП НА ПЛОСКОСТИ С ТРЕНИЕМ	109
А.А. Адамов, А.А. Каменских, Ю.О. Носов АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОСТА ПРИ УЧЕТЕ УГЛУБЛЕНИЙ ПОД СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ В СФЕРИЧЕСКОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКЕ	110
Я.Н. Паршакова ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЛПОВОГО ВЫНОСА ПРИМЕСИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОТОКА И ДНА В ПРОЦЕССЕ ТЕЧЕНИЯ РЕКИ	111

Т.П. Любимова, Я.Н. Паршакова, В.Ю. Колчанов, А.П. Лепихин, Ю.С. Ляхин, А.В. Богомолов, А.А. Тиунов	112
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ СТРУКТУР, ФОРМИРУЕМЫХ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ В ЗОНАХ АКТИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА	
В.В. Перминов, Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев	113
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ГОРЯЩИХ И ТЛЕЮЩИХ ЧАСТИЦ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПОЖАРОВ	
И.Е. Петраков	114
ИЗГИБ МНОГОСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПО-РАЗНОМУ СОПРОТИВЛЯЮЩЕЙСЯ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ	
М.А. Петухова, В.Г. Козлов	115
ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ЛИБРАЦИЙ НА ФОРМУ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ	
И.И. Попов, М.В. Шитикова, А.В. Левченко	116
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ДРОБНОСТИ ДЛЯ ВЯЗКОУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПИСАНИИ СВОЙСТВ БЕТОНОВ И ПОЛИМЕРБЕТОНОВ	
С.С. Попович	117
АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В СВЕРХЗВУКОВОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА	
С.С. Попович, А.И. Леонтьев, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, Ю.А. Виноградов	118
О ВОЗМОЖНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ СТЕНКИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ГАЗО-КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ	
С.С. Попович, А.И. Леонтьев, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, Ю.А. Виноградов	119
ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА	
И.О. Ракишева, А.Р. Хайрулин, А.Г. Кучумов	120
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИКИ И ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА РАДИАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА	
К.А. Рыбкин, Т.П. Любимова, О.О. Фатталов, М.О. Кучинский	121
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЗЫРЬКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССУ ФЛОТАЦИИ	
Д.А. Рязанов, И.Н. Сибгатуллин	122
СЕДИМЕНТАЦИЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	
Н.А. Гуреева, В.В. Рябуха	123
РАСЧЕТ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ТЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МКЭ В СМЕШАННОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ	
Е.В. Садырин, Д.В. Ёгина, М.В. Свэйи, С.М. Айзикович	124
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДОРОВЫХ И ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ТВЁРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБА	
Г.Р. Сайпулаев, Б.И. Адамов, А.И. Кобрин	125
МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МЕКАНУМ-ПЛАТФОРМЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЮ КОЛЕС, ИНЕРЦИОННОСТЬ РОЛИКОВ И ПОЛИКОМПОНЕНТНОЕ КОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ	
В.Ю. Саламатова, А.А. Легкий, Ю.В. Василевский	126
МЕТОД УЗЛОВЫХ СИЛ ДЛЯ ГИПЕРУПРУГОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧАМ БИОМЕХАНИКИ	
Ф.А. Сёмин, А.К. Цагурян	127
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ С ПОЛНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ СОПРЯЖЕНИЕМ	

И.Н. Сибгатуллин, Е.В. Ерманиук, Н.Д. Шмакова, А.А. Третьяков ВИХРЕВЫЕ КЛАСТЕРЫ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СЛОЯХ С НЕОРТОГОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ	128
В.О. Сеницына, И.А. Фаттахова¹, К.А. Рыбкин, О.О. Фатгалов, Т.П. Любимова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОАЛЕСЦЕНЦИИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	129
И.В. Смолехо ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ, УЧИТЫВАЮЩИЙ МЕХАНИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ	130
А. А. Спасова ЗАДАЧА О СИММЕТРИЧНОМ КАВИТАЦИОННОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА ПРИ НАЛИЧИИ СТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА	131
Д.И. Спорышева РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЖЕЛЧНЫХ ПРОТОКОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ ИМПЛАНТОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И МИКРОСКОПИИ	132
О.Г. Сутырин, П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПУЗЫРЬ	133
Д.И. Татаренкова, И.А. Знаменская ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ	134
В.М. Темербеков ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ МНОГОРЯДНОЙ РЕШЕТКОЙ В ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ	135
В.В. Терауд, Е.С. Шевченко НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В МЕХАНИКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	136
А.И. Решмин, В.В. Трифонов, С.Х. Тепловодский ТЕПЛООБМЕН В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ	137
П.М. Тюбаева, А.К. Зыкова, А.А. Ольхов, А.А. Попов, Е.С. Мороков МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ВОЛОКНАХ БИОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ	138
И. С. Уткин, А. А. Афанасьев МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОНТАННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ	139
А.В. Земсков, Г.М. Файкин НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ИЗГИБ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЕННОЙ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ- ЭЙЛЕРА С УЧЕТОМ ТЕРМОДИФФУЗИИ	140
О.О. Фатгалов, К.А. Рыбкин, Т.П. Любимова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ И ПАВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	141
И.А. Фаттахова, В.О. Сеницына, К.А. Рыбкин, О.О. Фатгалов, Т.П. Любимова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ЕДИНИЧНОГО ПАРОГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	142
Ю.В. Федоров ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ С ПОКРЫТЫМИ ОБОЛОЧКОЙ ПУЗЫРЬКАМИ	143
А.С. Оконечнико, Г.В. Федотенков, Е.С. Феоктистова НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕМБРАНЫ С ЖЁСТКИМ УДАРНИКОМ ПРИ УЧЕТЕ СИЛ АДГЕЗИОННОГО ДАВЛЕНИЯ	144

О.А. Симонов, Л.Н. Филимонова КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ВОДЫ	145
А.Р. Хайрулин, А.Г. Кучумов, М.И. Шмурак, А.А. Породииков БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ «АОРТА – ШУНТ – ЛЕГОЧНАЯ АРТЕРИЯ» НА ЛОКАЛЬНУЮ ГЕМОДИНАМИКУ	146
В.В. Химуля РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД- КОЛЛЕКТОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОКОМПОНЕНТОГО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ	147
А.А. Чернова, А.А. Афанасьев ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ ФАЗ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ	148
А.А. Чернова, А.И. Андреева, А.А. Афанасьев ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКАЧКИ ВОДЫ И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ИЕРАРХИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ НЕФТЯНОГО ПЛАСТА	149
Д.Г. Чечин, К. Люпкес, Й. Хартманн САМОЛЕТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД МОРСКИМ ЛЬДОМ В АРКТИКЕ	150
Т.Н. Чикова, В.М. Тверье ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ	151
А.О. Чирков, М.О. Ерёмин КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТАДИЙ ПЛОЩАДКИ ТЕКУЧЕСТИ И ЛИНЕЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	152
В.А. Гордин, Д.А. Шадрин КОМПАКТНАЯ РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С РАЗРЫВНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ. ЛИНИЯ СКАЧКА КОЭФФИЦИЕНТА С ИЗЛОМОМ	153
Л.Р. Шайдуллин., А.А. Кабиров ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА И АЭРОЗОЛЯ В ЗАКРЫТОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ЧЕРЕЗ РЕЗОНАНСНУЮ ЧАСТОТУ	154
Б.Р. Шарифуллин, С.Г. Скрипкин, И.В. Наумов ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРЕ С ВЕРХНИМ И НИЖНИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТОРЦОМ	154
Т.С. Шарифуллина, А.А. Черевко, В.В. Остапенко МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВОТОКА В ОКРЕСТНОСТИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ ПРИ МНОГОЭТАПНОЙ ЭМБОЛИЗАЦИИ	156
М.И. Шмурак, А.Г. Кучумов, А.Ф. Мерзляков ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОСУДИСТЫХ ТРАНСПЛАНТАТОВ GORE-TECH	157
А.А. Яковенко ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ НЕРОВНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА	158
Р.М. Янбарисов НЕЯВНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ДИНАМИЧЕСКИ АДАПТИВНЫХ СЕТКАХ	159
А.Д. Ястребов, В.В. Аристов, А.В. Строганов ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПАНДЕМИИ COVID-19 НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА	160

МЕХАНИКА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ: ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ

А.Ю. Вараксин^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: varaksin_a@mail.ru

В последние десятилетия можно наблюдать устойчивый интерес многочисленных групп исследователей во всем мире к изучению двухфазных (многофазных) течений.

Потоки сплошной среды, несущие дисперсную примесь в виде твердых частиц, капель или пузырей, имеют место в целом ряде природных явлений: воздушные и водяные смерчи, песчаные бури, извержения вулканов, лесные пожары, выпадение осадков в виде града, снега, дождя, разные виды туманов, выделение газов в морях и океанах и т.п. Примерами технических устройств, в которых используются двухфазные течения, являются: камеры сгорания тепловых двигателей, тракты твердотопливных и жидкостных реактивных двигателей, устройства термоподготовки угля в схемах энерготехнологического использования топлива, парогенераторы, системы пожаротушения, теплообменники с двухфазными рабочими телами, устройства песко- и дробеструйной обработки различных поверхностей, пневмотранспортеры сыпучих материалов, пылеуловители различных типов и мн. др.

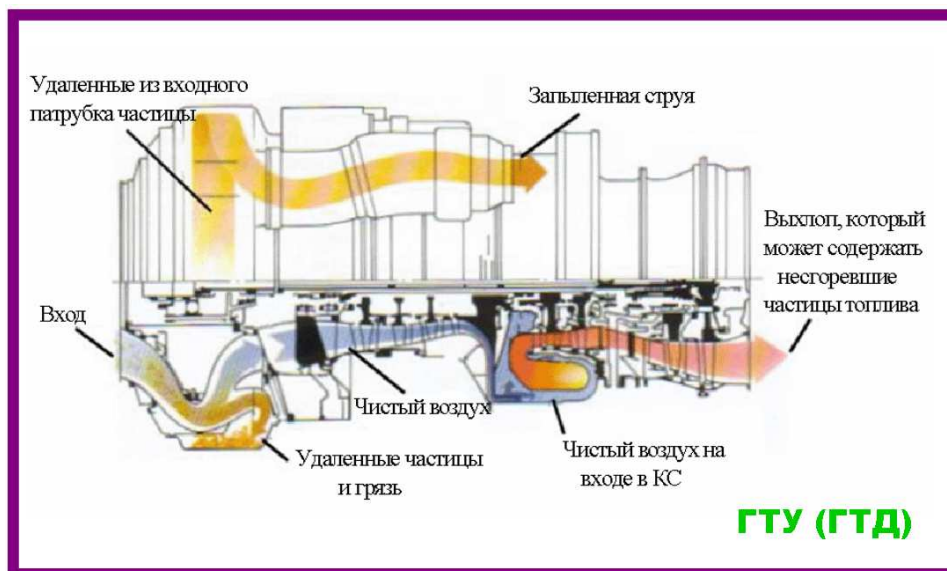


Иллюстрация наличия дисперсной примеси в виде твердых частиц (или капель) по всему газоздному тракту ГТУ (ГТД)

Рассмотрены проблемы и особенности изучения течений сплошных сред, содержащих дисперсную примесь в виде твердых частиц, капель или пузырей. Описаны некоторые результаты последних исследований двухфазных потоков и возможности их использования для решения широкого круга прикладных задач.

1. Вараксин А.Ю. Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 588–608.

2. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646–669.

3. Вараксин А.Ю. Двухфазный пограничный слой газа с твердыми частицами // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 789–808.

4. Вараксин А.Ю. О влиянии макро-, микро- и наночастиц на турбулентность несущего газа // ДАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 497. № 1. С. 36–39.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЖИДКОСТИ И БИМЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Ю.В. Василевский

Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва,
Сеченовский Университет, Москва
МФТИ, Долгопрудный
e-mail: yuri.vassilevski@gmail.com

В докладе будет представлена новая численная схема для расчета взаимодействия течения несжимаемой жидкости и упругих стенок (FSI), а также ее верификация на двух тестовых задачах [1,2]. Кроме того, будут рассмотрены биомедицинские приложения кровотока в областях, зависящих от времени, которые могут быть рассчитаны с помощью более простых, чем FSI, моделей: кровотоков в желудочках сердца (Рис.1) [3,4,5], закрытие аортального клапана [6].

Соавторами этого доклада являются М.А.Ольшанский, А.В.Лозовский, А.А.Данилов, В.Ю.Саламатова, А.А.Легкий.

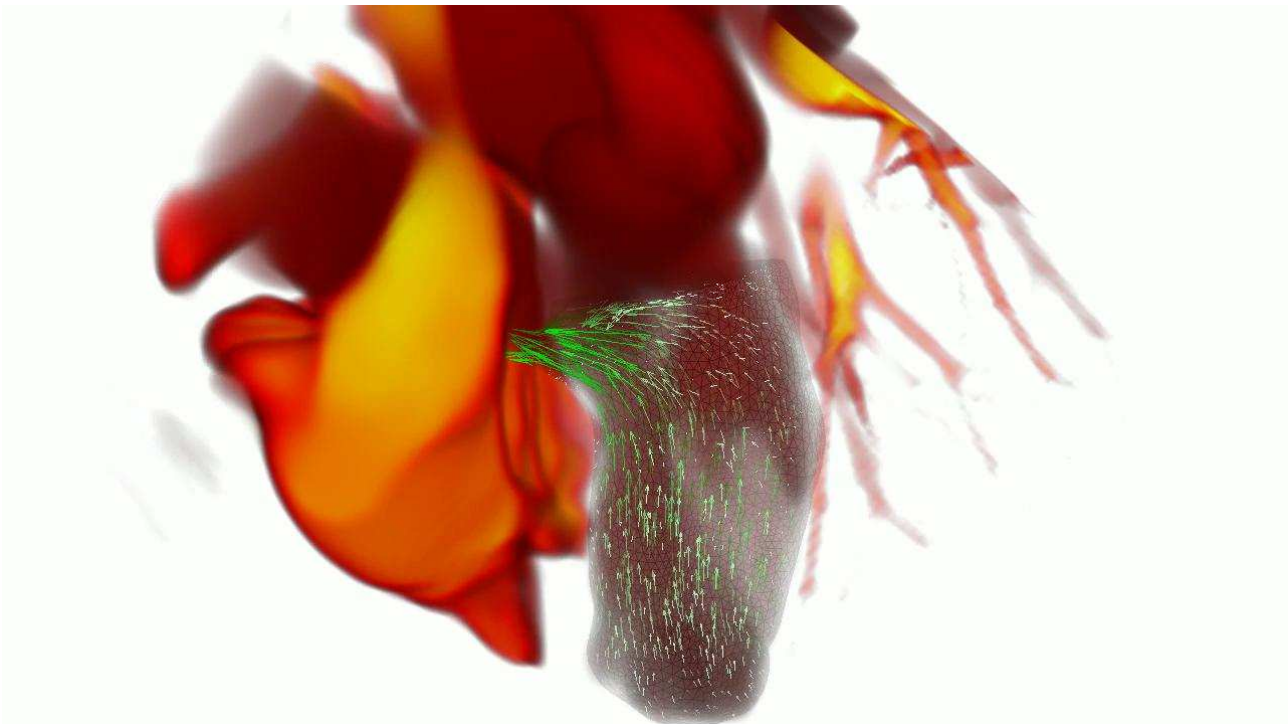


Рис.1. Расчетная сетка и поле скоростей в левом желудочке человека

1. Lozovskiy A., Olshanskii M., Salamatova V., Vassilevski Yu. An unconditionally stable semi-implicit FSI finite element method // *Comput.Methods Appl.Mech.Engrg.*, 2015, V.297, 437-454.
2. Lozovskiy A., Olshanskii M., Vassilevski Yu. Analysis and assessment of a monolithic FSI finite element method // *Comp. & Fluids*, 2019, V.179, 277-288.
3. Danilov A., Lozovskiy A., Olshanskii M., Vassilevski Yu. A finite element method for the Navier-Stokes equations in moving domain with application to hemodynamics of the left ventricle // *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2017, V.32, №4, 225-236.
4. Lozovskiy A., Olshanskii M., Vassilevski Yu. A quasi-Lagrangian finite element method for the Navier-Stokes equations in a time-dependent domain // *Comput.Methods Appl.Mech.Engrg.*, 2018, V.333, 55-73.
5. Yu.Vassilevski, A.Danilov, et al. A stable method for 4D CT-based CFD simulation in the right ventricle of a TGA patient // *Russ.J.Numer.Anal.Math.Modelling*, 2020, V.35, №5, 315-324.
6. V.Salamatova, A.Liogky, et al.Numerical assessment of coaptation for auto-pericardium based aortic valve cusps // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2019, V.34, №5, 277-287.

ИСТОРИЯ ПОДГОТОВКИ ПОЛЕТА Ю.А. ГАГАРИНА

Ю.Ф. Голубев

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва

e-mail: golubev@keldysh.ru

Полет Ю.А. Гагарина был выдающимся достижением отечественной космонавтики. Он произошел благодаря скоординированным усилиям специалистов в области аэродинамики и ракетостроения, космической биологии и медицины, эргономики и служб спасения. Многие проблемы, связанные с выводом ИСЗ на орбиту, были к тому времени разрешены при запуске первого ИСЗ. Однако, вопросы безопасного возвращения на Землю посадочного модуля с космонавтом за счет торможения в атмосфере оставались не вполне изученными. Из-за этого успех первого полета КА с человеком на борту был под большим сомнением. Серьезные опасения вызывали такие факторы, как огромные перегрузки из-за аэродинамического торможения, интенсивный тепловой разогрев, эрозия оболочки КА из-за высоких температур. В докладе будет рассказано о том, каким образом в результате героических усилий Советских энтузиастов-ученых указанные трудности были преодолены, и дорога в космос оказалась открытой для человечества.



МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ С МЯГКИМИ БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

И.Г.Горячева¹

¹ Институт механики МГУ, Москва

e-mail: goryache@ipmnet.ru

Модели механики контактных взаимодействий находят широкое применение при анализе взаимодействия медицинских инструментов с различными биологическими тканями, а также при разработке методов оценки механических характеристик сложных биологических объектов. Полученные знания имеют самостоятельный интерес, а также используются для разработки сложных робототехнических устройств для проведения различного рода малоинвазивных операций, в том числе с возможностью тактильного очувствления действий хирурга во время операций на различных органах.

Излагаются методы решения контактных задач о взаимодействии медицинского инструмента с мягкой упругой тканью, основанные на подходах механики дискретного контакта [1]. Анализируется влияние формы поверхности инструмента на распределение контактных давлений и на зависимость внедрения инструмента от приложенной к нему силы [2]. Ставятся вопросы выбора формы поверхности инструмента, обеспечивающей более равномерное распределение действующей нагрузки по поверхности инструмента.

При разработке позиционирующего медицинского оборудования возникает необходимость описания процесса взаимодействия иглы с биологической тканью (рис.1а) или фантомом, моделирующим механическое поведение мягких тканей. Процесс взаимодействия иглы с мягкими

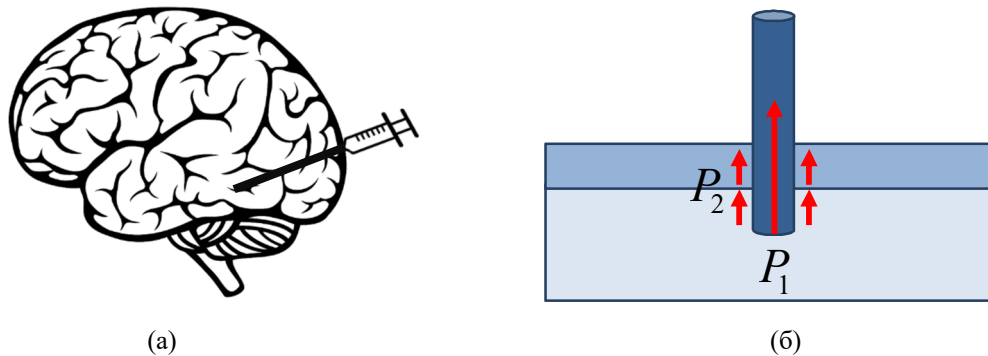


Рис.1 Внедрение иглы в ткань головного мозга (а) и схема контакта, используемая при моделировании (б).

тканями включает в себя несколько стадий: сжатие мягкой ткани, прокол, углубление иглы в ткань на большую глубину, удержание ее на этой глубине и дальнейшее ее извлечение. При этом необходимо учитывать такие механические процессы, происходящие в ткани, как упругое сжатие, разрушение поверхностного слоя, большие деформации, релаксация напряжений, трение (рис.2б). Для описания механического поведения биологической ткани применяются упруго-вязко-пластические модели. Использование аналитических методов позволяет получить зависимости силы от времени (или глубины внедрения) в течение всего процесса взаимодействия.

Важным применением методов механики в медицине является также разработка приборов для определения механических свойств биологических тканей [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-58-52004).

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.
2. Яковенко А.А. Моделирование контактного взаимодействия захватывающего инструмента с биологической тканью. Российский журнал биомеханики. 2017, т.21, № 4, сс.418-428
3. M.M. Gubenko, A.V. Morozov, A.N. Lyubicheva, I.G. Goryacheva, M.Z. Dosaev, M.-Sh. Ju, Ch.-S. Yeh, F.-Ch. Su. Video-tactile pneumatic sensor for soft tissue elastic modulus estimation. BioMedical Engineering. 2017, V.16, № 94

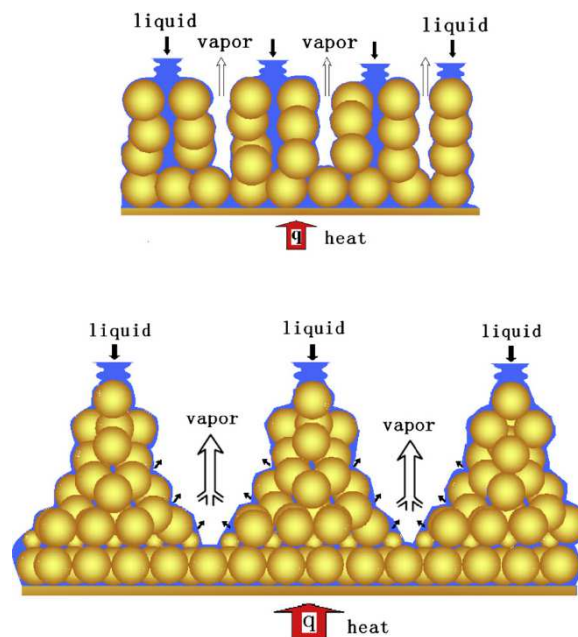
ОСОБЕННОСТИ КИПЕНИЯ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

А.В. Дедов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
e-mail: dedovav@mpei.ru

Пожалуй, не одна из задач теплообмена не может сравниться по числу проведенных исследований и имеющихся уравнений для расчета с задачей теплообмена при кипении. На рубеже столетий появились новые технические возможности, прежде всего связанные с модификацией поверхности. Использование т.н. наножидкостей и наноматериалов, фемтосекундного лазерного воздействия, плазменной и ионной обработки позволило получить значительное число новых результатов, обусловило всплеск соответствующих исследований. Традиционно, большая часть исследований выполнена для условий кипения при свободной конвекции, с целью установления основных влияющих факторов и отыскания общих закономерностей. Далее результаты переносятся на условия кипения в потоке и в испарительные каналы. Подробное рассмотрение методов интенсификации теплообмена при кипении выполнено в работе [1].

Преобладающим мнением о причинах интенсификации теплообмена и критических тепловых нагрузок (КТП) при кипении на структурированных поверхностях в зарубежной литературе является разделение путей притока жидкости к поверхности и отвода пара от нее, приводящее к увеличению гидродинамической устойчивости восходящего течения пара от поверхности в т.н. «колоннах». Происходит своеобразная регуляция движения потоков жидкости и пара, поддержка постоянно действующих центров парообразования. Ключевым фактором, обеспечивающим подобные условия, является созданная специально неизотермичность поверхности теплообмена. Пример поверхности со структурой, обеспечивающей подобное разделение потоков, представлен на рисунке, заимствованным из работы [2].



Структурированная поверхность теплообмена [2]

В докладе выполнен обзор основных результатов, полученных в области интенсификации теплообмена при кипении на структурированных поверхностях. Выполнено сравнение достигнутых значений КТП. Представлены результаты исследования теплообмена при кипении на модифицированных с помощью пучковой и лазерной обработки поверхностей.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00410).

1. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18-54.

2. Choi C-H., David M., Gao Z., Chang A., Allen M., Wang H., Chang C-H. Large-scale Generation of Patterned Bubble Arrays on Printed Bi-functional Boiling//Surfaces Scientific Reports. 2016. vol. 6 (23760)

ДИНАМИКА ВУЛКНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.Э. Мельник, И.С. Уткин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: melnik@imec.msu.ru

В настоящее время меняется парадигма понятия магматический очаг. Ранее считалось, что в верхней коре Земли находятся полости, заполненные магматическим расплавом и существующие в течение сотен тысяч лет. Механизмы формирования подобных очагов не рассматривались, а их обнаружение геофизическими методами недоказательно. В работах С. Спаркса с коллегами [1] предложена новая схема строения магматических систем, состоящая из отдельных областей, заполненных частично закристаллизованным магматическим расплавом, которые связаны между собой динамической системой каналов. Подобная система может существовать в течение миллионов лет при дискретном внедрении свежих порций магмы, а ее реактивация перед извержением происходит на порядки быстрее за счет ускорения подпитки. Существующие модели [2,3] рассматривают крайне упрощенную геометрию системы: в осесимметричной постановке магма внедряется в центральную область цилиндра в виде даек (вертикально) или силлов (горизонтально), что не позволяет воспроизвести сложное строение природных систем.

Нами разработана двумерная модель формирования распределенной магматической системы за счет внедрения даек и силлов в область упругих вмещающих пород, перемещения которых описываются аналитическим решением задачи об эллиптической полости, нагруженной внутренним давлением. Модель учитывает теплообмен, плавление и кристаллизацию магмы и пород, выделение скрытой теплоты кристаллизации и адвекцию тепла за счет упругих перемещений [4].

Для решения уравнения теплопроводности написана программа для использования на графических ускорителях, что позволило достичь пространственного разрешения в 5 м при размерах расчетной области в десятки километров. Расчеты показывают, что при внедрении магмы в холодные породы в течение 100 тыс. лет формируется вертикально протяженная система областей, заполненных частично расплавленными породами и раскристаллизованной магмой (Рис.1).

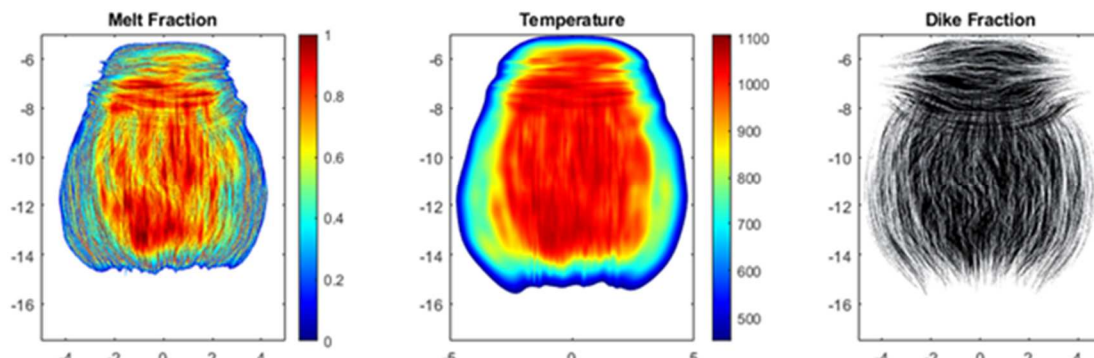


Рис. 1 Распределение объемной доли расплава, температуры и внедрившейся магмы.

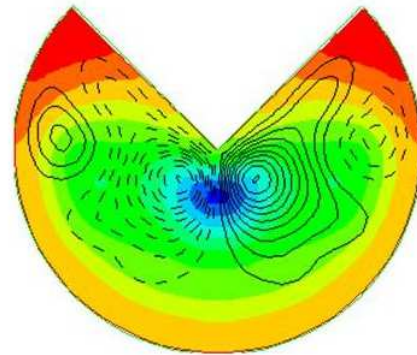
1. Cashman, K. V., Sparks, R. S. J., & Blundy, J. D. (2017). Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes// Science. <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
2. Annen, C., Blundy, J.D., Sparks, R. S. J. (2006) The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones// Journal of Petrology 47 (3), 505-539.
3. Caricchi, L., Simpson, G., & Schaltegger, U. (2016). Estimates of volume and magma input in crustal magmatic systems from zircon geochronology: The effect of modeling assumptions and system variables.//Frontiers in Earth Science. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00048>
4. Melnik O. E., Utkin I. S., Bindeman I. N. Magma chamber formation by dike accretion and crustal melting: 2d thermal model with emphasis on zircon record // Earth and Space Science Open Archive. – Wiley, 2020.

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРАНДТЛЯ 2 РОДА

Н.В. Никитин¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: nvnikitin@mail.ru

В работе сформулирован механизм, позволяющий объяснять, а в ряде случаев и предсказывать форму вторичных течений Прандтля второго рода, возникающих в турбулентных течениях в прямых трубах некруглого сечения с гладкими стенками [1,2]. Вторичные течения согласованы с распределением среднего давления по периметру поперечного сечения. На участке границы между соседними точками локального максимума и минимума давления частицы жидкости должны двигаться вдоль границы по направлению от большего давления к меньшему, поскольку напряжения Рейнольдса на твёрдой стенке отсутствуют, и сила давления может быть уравновешена только силой вязкого трения, действующей навстречу движению. В ряде случаев, расположение локальных экстремумов давления по периметру сечения трубы может быть установлено на основе анализа кривизны границы. Пульсационное движение по искривлённой траектории вдоль границы вызывает изменение давления на стенке тем большее, чем больше кривизна границы. На вогнутых участках границы возникает повышение давления, а на выпуклых, наоборот, возникает разряжение. Действенность предложенного принципа продемонстрирована на ряде известных из литературы примерах: течения в трубе квадратного сечения [3], в трубе эллиптического сечения [4], в трубах с сечением в виде кругового сектора с углом при вершине в 90 и 270 градусов, в прямоугольных трубах с закруглёнными углами [5], в эксцентрической кольцевой трубе [6]. В большинстве случаев примерную картину вторичных течений удаётся предсказать априори, пользуясь лишь соображениями симметрии и анализом кривизны границы поперечного сечения.



Распределение среднего давления и линии тока вторичного течения в трубе с сечением в виде кругового сектора с углом при вершине в 270 градусов.

Условия сформулированного механизма нарушаются вблизи свободных границ, где кроме градиента давления на частицы жидкости действуют также касательные напряжения и результат их конкуренции заранее неизвестен. В работе приводятся результаты прямого численного моделирования турбулентных течений в прямоугольных каналах, содержащих свободные границы, демонстрирующие и объясняющие особенности вторичных течений в этих случаях.

Результаты данной работы дают рациональную основу для понимания причин формирования и предсказания формы вторичных течений Прандтля второго рода, возникающих в прямых трубах некруглого сечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-19-00404.

1. Nikitin N. Turbulent secondary flows in channels with no-slip and shear-free boundaries // J. Fluid Mech. 2021. V. 917. A24.

2. Никитин Н.В., Попеленская Н.В., Stroh A. Вторичные течения Прандтля 2-го рода. Проблемы описания, предсказания, моделирования // Изв. РАН, МЖГ. 2021. №4. С. 1–27.

3. Никитин Н. В., Пиманов В.О., Попеленская Н.В. К вопросу об образовании вторичных течений Прандтля 2-ого рода // ДАН. 2019. Т. 484. № 4. С. 1–5.

4. Nikitin N., Yakhot A. Direct numerical simulation of turbulent flow in elliptical ducts // J. Fluid Mech. 2005. V. 532. P. 141–164.

5. Vidal A., Vinuesa R., Schlatter P., Nagib H.M. Turbulent rectangular ducts with minimum secondary flow // Int. J. Heat Fluid Flow. 2018. V. 72. P. 317–328.

6. Nikitin N., Wang H., Chernyshenko S. Turbulent flow and heat transfer in eccentric annulus // J. Fluid Mech. 2009. V. 638. P. 95–116.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

К.Э. Абдульманов¹, Н.В. Никитин¹

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

В работе проведено численное исследование линейной устойчивости пространственно развивающейся осесимметричной затопленной струи. Жидкость считается вязкой и несжимаемой. Профиль скорости струи в начальном сечении расчётной области в численном расчёте совпадает с профилем скорости струи на срезе сопла в экспериментальной установке лаб. 103 НИИ механики МГУ. Пространственное развитие струи рассчитывается методом установления путём решения уравнений Навье-Стокса. Исследования устойчивости получаемого таким образом стационарного основного течения выполнены в двух постановках: в рамках решения задачи Орра-Зоммерфельда для серии профилей скорости, соответствующих развивающейся струе на разных расстояниях от сопла, и путём решения уравнений Навье-Стокса, линеаризованных около стационарного решения, описывающего основное осесимметричное течение во всей области развития. В этом случае возмущение с заданной частотой ω и азимутальным номером n задаётся во входном сечении расчётной области, а его эволюция вниз по течению рассчитывается путём решения нестационарных уравнений Навье-Стокса. Расчёты проводились при $Re=5700$ (число Рейнольдса определяется через среднюю скорость и радиус сопла), совпадающем со значением Re в экспериментах, проводимых параллельно в лаб. 103 НИИ механики МГУ.

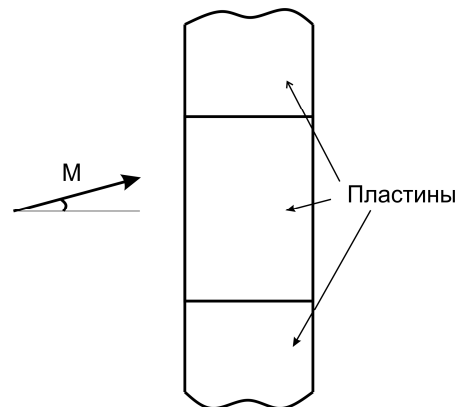
Найдены значения коэффициентов нарастания возмущений на различных расстояниях от входного сечения при разных частотах и азимутальных номерах. Получено удовлетворительное согласие результатов в двух рассмотренных постановках. Проведено сопоставление с экспериментальными данными и с результатами анализа устойчивости в рамках уравнения Рэлея.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-19-00404 с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

ФЛАТТЕР ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НЕНУЛЕВОМ УГЛЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

Ф.А. Абдухакимов, В.В. Веденеев
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: farruh.abduhakimov7@gmail.com

Панельный флаттер – потеря устойчивости и интенсивные вибрации панелей обшивок летательных аппаратов, возбуждающихся при взаимодействии с потоком воздуха при больших скоростях полета. Обычно панельный флаттер не приводит к немедленному разрушению летательного аппарата, но приводит к накоплению усталостных повреждений панелей и сокращению их срока службы [1]. Существует два типа панельного флаттера. Первый – это связанный флаттер, который обусловлен взаимодействием двух собственных мод панели. Второй тип – одномодовый флаттер, при этом типе панельного флаттера не происходит слияния собственных частот и значительного изменения формы колебаний в потоке. Одномодовый флаттер обусловлен отрицательным аэродинамическим демпфированием.



В работе исследуется устойчивость бесконечной серии тонких упругих прямоугольных пластин, шарнирно опертых по всем краям. Пластины с одной стороны обтекаются однородным сверхзвуковым потоком идеального невязкого газа. С другой стороны пластин задано постоянное давление, так что невозмущенное состояние пластин является плоским. Границы панельного флаттера определяются при различных значениях угла скольжения. При этом изучается случай сверхзвуковой передней кромки.

С помощью теории потенциального течения получено выражение для нестационарного распределения давления по колеблющейся пластине. Уравнение движения пластины после подстановки выражения для нестационарного давления сводится к интегро-дифференциальной задаче на собственные значения. Для решения полученной задачи используется метод Бубнова – Галеркина. Критерием флаттера при таком подходе будет знак мнимой части комплексного собственного значения.

Показано, как изменяются границы одномодового и связанного флаттера при изменении угла скольжения. При малых углах скольжения результаты качественно близки к результатам при нулевом угле [2]. С увеличением угла скольжения области одномодового флаттера начинают исчезать при все больших значениях безразмерной ширины (ширины, отнесенной к толщине) пластины.

Увеличение угла скольжения также приводит к появлению нерегулярных границ флаттера и образованию изолированных областей неустойчивости. По сравнению с нулевым углом появляются новые области флаттера панели, которые вызваны взаимодействием трех или более собственных мод через аэродинамическую связь.

Результаты настоящей работы могут быть использованы для создания метода подавления флаттера, возникающего при косом обтекании панели обшивки ЛА.

1. Dowell, E.H., 1974. Aeroelasticity of Plates and Shells. Nordhoff International Publishing, Leyden, 1974.

2. Shitov S., Vedeneev V. Flutter of rectangular simply supported plates at low supersonic speeds//Journal of fluids and structures. 2017. Vol. 69. P. 154-173.

ЗАКОНЫ СТЕНКИ ДЛЯ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

И.И. Вигдорович, А.И. Агеев, Т.А. Манаенкова
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: vigdorovich.igor@gmail.com, aaiageev@mail.ru

Установлены законы подобия для профилей скорости и температуры, справедливые в пристеночной области до- и сверхзвукового турбулентного пограничного слоя, которые позволяют представить профили скорости и температуры в потоке сжимаемого газа через профили этих величин в несжимаемом пограничном слое. Они получены как асимптотические разложения решения уравнений Рейнольдса по малому параметру – числу Маха, вычисленному по динамической скорости и энтальпии газа на стенке. Главный член разложения для профиля скорости соответствует известной формуле Ван Дриста. Однако полученное решение содержит еще дополнительные слагаемые порядка единицы, что объясняет расхождение формулы Ван Дриста с экспериментальными данными. Аналогичную структуру имеет закон стенки для температуры, который для сжимаемого течения сформулирован впервые.

Кроме постоянной Кармана и турбулентного числа Прандтля в логарифмической области, известных для течения несжимаемой жидкости, полученные соотношения содержат три новые универсальные константы, которые не зависят от молекулярных свойств и отношения теплоемкостей газа.

Работа выполнена при поддержке гранта [Московского Центра фундаментальной и прикладной математики](#).

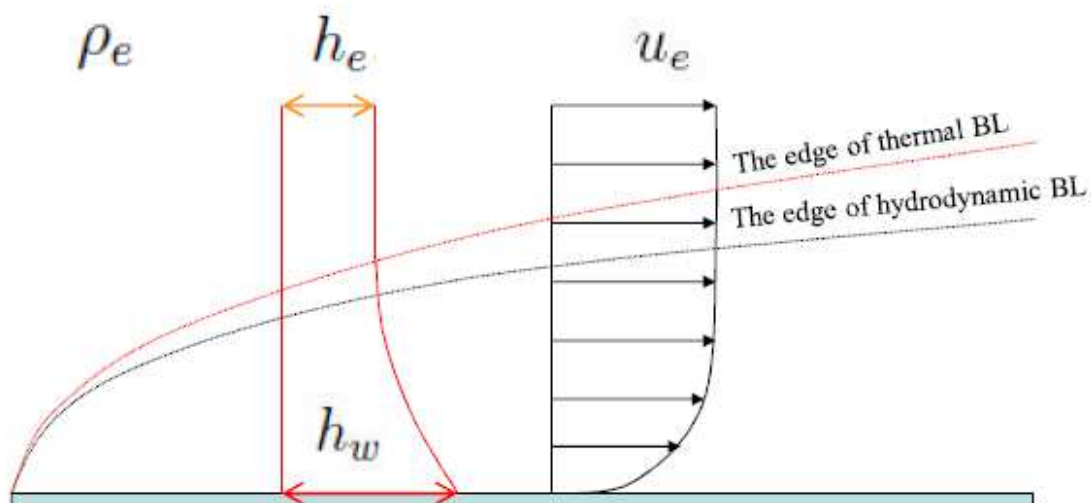


Рис.1. Сверхзвуковой турбулентный пограничный слой

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОГО РЕБРА

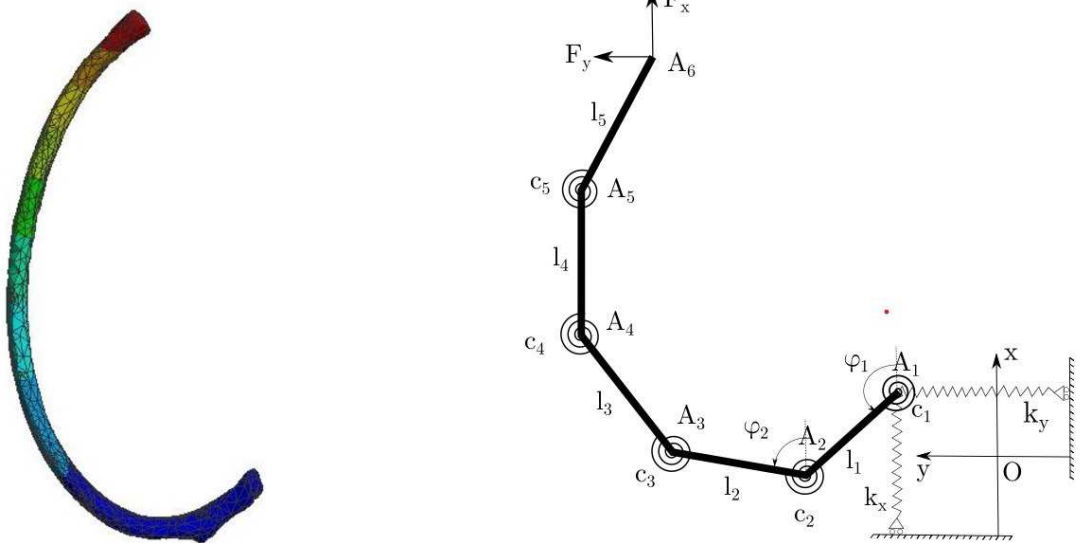
И.В. Алпатов¹

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: alpatov.ivan@list.ru

Была поставлена глобальная задача моделирования грудной клетки для применения в лечении пациентов с килевидной деформацией. Подобное моделирование, особенно с помощью программ конечно-элементного анализа¹, является своевременным и отвечающим запросам современной медицины.

В данном исследовании была построена механическая модель плоского ребра под нагрузкой, приложенной к его концу. Модель ребра состоит из 5 абсолютно твердых стержней, соединенных между собой спиральными пружинами и расположенных в одной плоскости. Спиральная пружина в начале первого стержня препятствует повороту этого стержня в плоскости. Также начало первого стержня соединено цилиндрическими пружинами с двумя перпендикулярными друг другу неподвижными плоскостями, что моделирует податливость в синовиальном суставе головки ребра. В изначальном положении все пружины не деформированы.

Для данной системы были получены уравнения равновесия под действием плоской силы, приложенной к свободному концу ребра. При известных жесткостях пружин и геометрических параметрах ребра данная система позволит быстро вычислять деформированное состояние ребра. Геометрические параметры, а именно длины стержней и углы между ними в недеформированном состоянии были найдены с помощью специализированной медицинской программы 3D Slicer, позволяющей сегментировать необходимые области по КТ сканам пациентов. Для нахождения решения уравнений равновесия необходимо идентифицировать параметры – жесткости пружин.



Конечно-элементная модель ребра в Ansys (слева) и стержневая модель плоского ребра (справа)

Жесткости пружин находились из гипотезы равенства перемещений свободного конца ребра в стержневой модели и в модели ребра как криволинейной линейно-упругой однородной изотропной плоской балки. Перемещения в балочной модели находились численно с помощью интеграла Мора. Также было произведено моделирование ребра в программе конечно-элементного анализа Ansys. Ребро моделировалось линейно-упругим изотропным материалом. Механические характеристики материала, такие как модуль Юнга, были взяты из литературы¹. Для конечно-элементной модели было найдено напряженно-деформированное состояние. Различие перемещений свободного конца в рассмотренных моделях составляет не более 10%.

1. Грибов Д.А. Разработка биомеханической модели и методики планирования хирургического лечения воронкообразной деформации грудной клетки: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.08.- МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2016 - 157 с.

МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ КАПЕЛЬ С РЕЛЬЕФНЫМ ТЕЛОМ В ПОТОКЕ ГАЗА

И.А. Амелюшкин, А.Л. Стасенко

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская область
Московский физико-технический институт, Жуковский, Долгопрудный, Московская область

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru, Stasenko@serpantin.ru

На основе разработанных математических моделей удара/отскока и скольжения переохлажденных капель по гидрофобной поверхности сформулированы безразмерные параметры и характеристики гидрофобных покрытий. Такие покрытия эффективно работают при малых значениях числа Вебера $We = H\rho V^2/\sigma$ для капель, взаимодействующих с поверхностью тела (H – характерный период рельефа поверхности, ρ – плотность жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, V – нормальная компонента скорости удара капли). Однако в случае динамического воздействия жидкости льдофобные свойства могут привести к обратным эффектам из-за проникновения жидкости в углубления и отвердевания в них. Гидрофобные свойства покрытий, как правило, определяются краевым углом смачивания θ и связанным с ним тензором эффективной длины скольжения $\hat{b}(\theta, \varphi, L)$, преобразовав который, нетрудно получить выражение для граничного условия скольжения жидкости по гидрофобной поверхности: $V_{\text{скольж}} = \hat{b}(\theta, L, \varphi) \frac{\partial U}{\partial n}$; U – вектор скорости газа вблизи поверхности, n – нормаль к поверхности, φ – доля смоченной поверхности, L – ширина углубления в поверхности (рис. 1, слева). Наряду с описанными выше параметрами, противообледенительное покрытие следует характеризовать параметром, учитывающим скорость соударения переохлажденных капель и напряжение сил адгезии образующегося при отвердевании капель льда. Другим управляющим параметром является доля $\zeta = m_d / m_d^0$ первоначальной массы капли m_d , оставшейся на поверхности после ее ударе. Кроме того, если нормальная компонента скорости удара $V_n^{\text{max}} = V_\infty \exp(-1/4\text{Stk})$ переохлажденных капель о поверхность твердого тела меньше характерного зависящего от температуры T значения $V_0^* (1 - T/T_f)^{-7/10}$, капли останутся в жидком состоянии и будут двигаться по поверхности обтекаемого тела, не замерзая. Здесь Stk – число Стокса, V_∞ – скорость полета, $V_0^* \cong 8.9$ см/с, T_f – температура замерзания. На рис. 1 справа показана зависимость максимального размера периода полосчатой шероховатости поверхности гидрофобного тела от параметров аэрозольного потока в терминах чисел Вебера и Стокса. В работе получены выражения для сил, действующих на скользящие по поверхности капли с учетом их вращения и критерии перехода от режима качения в режим скольжения в зависимости от интегрального момента аэродинамической силы в пограничном слое на поверхности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-29-13024).

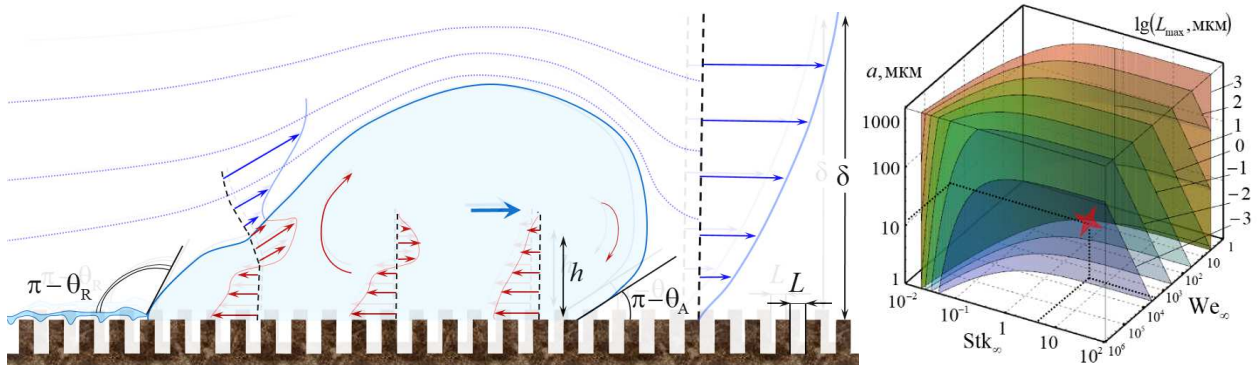


Рис. 1. Слева схема движения капли по поверхности; справа зависимость максимального расстояния между выступами от чисел Вебера, Стокса и радиуса капли a .

1. Amelyushkin I.A., Stasenko A.L. Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud // CEAS Aeronautics Journal. December 2018. V. 9. Issue 4. P. 711–720.
2. Амелюшкин И.А., Кудров М.А., Морозов А.О., Щеглов А.С., Стасенко А.Л. Модели процессов, сопровождающих кристаллизацию переохлажденных капель // Труды Института системного программирования РАН / Т. 1, № 2, 2020. С. 15–21.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОХВАТА НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

А. И. Андреева^{1,2}, А.А. Афанасьев²

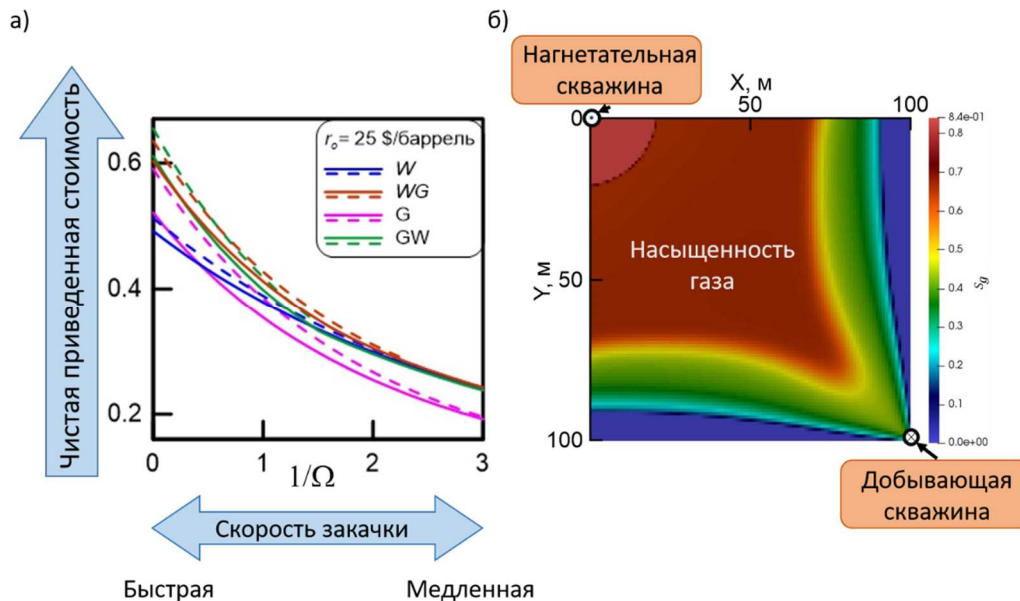
¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

e-mail: waandreeva@gmail.com

Для повышения нефтеотдачи пластов применяют различные методы, к примеру, закачка воды и газа. В статье [1] с использованием одномерной модели проведено исследование оптимальных режимов газового воздействия на нефтяные пласты с целью повышения нефтеотдачи и захоронения углекислого газа. Однако, реальные течения в пласте трехмерные, поэтому для более надежного описания фильтрации нужно использовать более сложные двух- и трехмерные модели. Но так как увеличение размерности влечет увеличение сложности вычислений, то рассмотрим только двумерную модель в плоскости Оху. Цель этого исследования понять, как меняется эффективная стратегия при переходе от одномерного течения к двумерному и насколько оправдано использование одномерной модели.

Закачка газа и/или воды проводится через нагнетательную скважину, расположенную в точке с координатами (0,0) (рисунок). Рядом с нагнетательной скважиной фронт вытеснения распространяется осесимметрично при малых временах закачки. Далее, при приближении к добывающей скважине (100,100) фронт вытягивается, оставляя неохваченными области рядом с границами $X=100$ и $Y=100$. Коэффициент охвата нефти в этом случае меньше единицы. В одномерном случае, когда вытеснением охвачен весь объем породы, коэффициент охвата равен единице. Так, значения чистой приведенной стоимости (NPV), соответствующие случаю 2-D, всегда ниже значений, соответствующих 1-D случаю. Но области оптимальных стратегий закачки качественно совпадают в 1-D и 2-D постановках задачи.



Зависимость чистой приведенной стоимости от скорости закачки (а), распределение насыщенности нефти при $1/\Omega = 0$ в конечный момент времени (б).

1. Afanasyev A.A., Andreeva A.I., Chernova A. A. Influence of oil field production life on optimal CO₂ flooding strategies: Insight from the microscopic displacement efficiency// Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. T. 205. С. 108803

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПОРИСТОЙ КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОЙ ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ

М.С. Астанина¹, М.А. Шеремет¹

¹Механико-математический факультет Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск
e-mail: astanina.marina@bk.ru

Проводится математическое моделирование термогравитационной конвекции в пористом замкнутом кубе при наличии тепловыделяющего элемента на нижней границе полости (рисунок 1). Боковые грани куба поддерживаются при постоянной низкой температуре, в то время как горизонтальные поверхности теплоизолированы. В качестве рабочей среды рассматривается ньютоновская теплопроводная жидкость. Предполагается также, что вязкость жидкости зависит от температуры по экспоненциальному закону и справедливо приближение Буссинеска [1]. Пористая среда моделируется в рамках модели Дарси–Бринкмана. Кроме того, температура пористого каркаса и рабочей жидкости считаются различными, и используется тепловая локально-неравновесная модель.

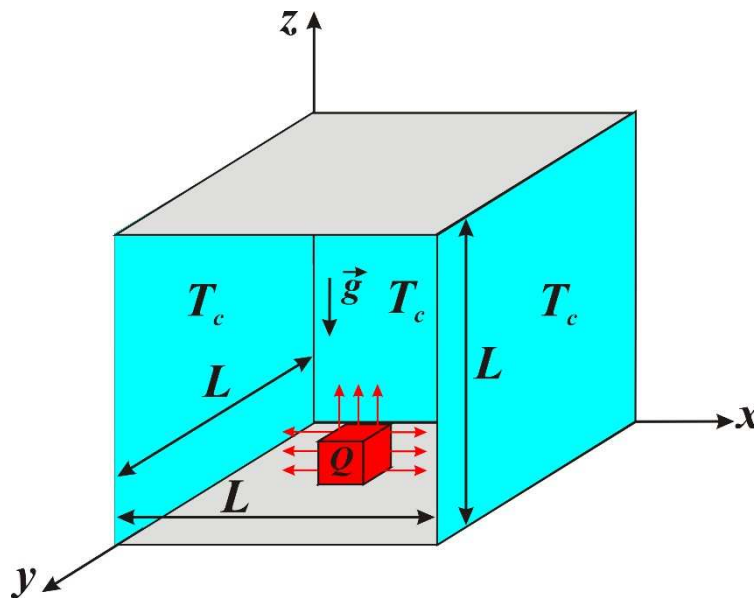


Рисунок 1. Физическая постановка задачи

Дифференциальные уравнения, описывающие конвективный теплообмен в рассматриваемой области, строились в безразмерных преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихренности». На границах раздела сред пористая среда/источник энергии сформулированы граничные условия четвертого рода.

В результате моделирования получены распределения полей температуры, компонент вектора скорости, а также интегральные характеристики теплообмена. Проанализирован широкий диапазон изменения определяющих параметров задачи и показаны зависимости между исходными параметрами и интенсивностью теплоотвода от нагревателя.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 20-31-90080).

1. Astanina M. S., Bernardo B., Oronzio M., Sheremet M. A. Transient free convection of variable viscosity liquid in an inclined cube affected by the temperature modulation on a vertical wall // International Journal of Thermal Sciences. 2021. Vol. 164. 106880.

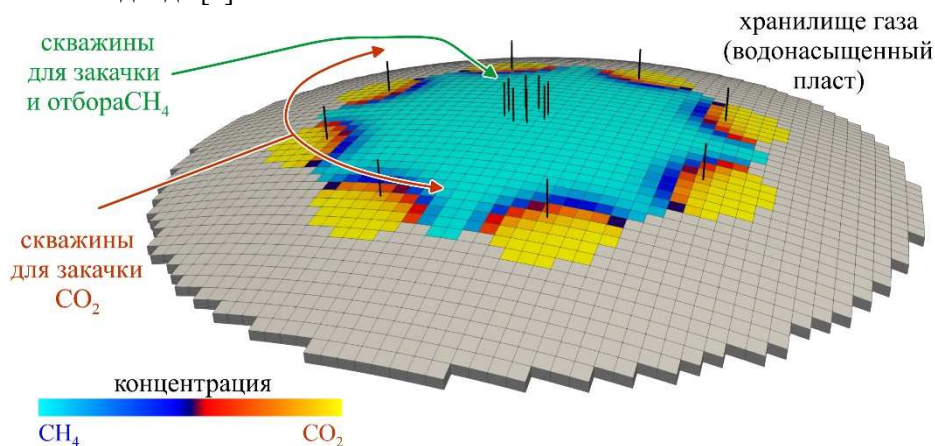
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЧКИ CO₂ В ПОДЗЕМНОЕ ХРАНИЛИЩЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А.А. Афанасьев¹

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

e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Расширена функциональность гидродинамического симулятора MUFITS для численного моделирования закачки многокомпонентных газов в водонасыщенные пласты. Расширение связано с развитием композиционного модуля симулятора, в котором парожидкостные равновесия многокомпонентных смесей рассчитываются с помощью кубического уравнения состояния [1]. В модуль встроена новая библиотека коэффициентов уравнения состояния для уточненного расчета растворимости CO₂, N₂, CH₄, H₂, O₂, H₂S и других углеводородных компонент в растворах соли. Для моделирования водных растворов используется подход, предполагающий использование различных и зависящих от солёности коэффициентов парного взаимодействия для водной и газовой фаз [2]. Для уточненного моделирования растворимости газа и плотности жидкой фазы разработано несколько модификаций данного подхода [2].



Синтетическая модель подземного хранилища природного газа. Показана концентрация CO₂ в газовой фазе.

Проведено тестирование разработанных алгоритмов в рамках расчета тестовых задач о закачке чистого сверхкритического CO₂ в водонасыщенные пласты. Также проведены расчеты более сложных процессов, демонстрирующие потенциальные области приложения разработанного расширения симулятора. Во-первых, проведено моделирование закачки дымового газа, т.е. смеси воздуха и CO₂, в водонасыщенный пласт. Показано, что даже небольшое количество воздуха (N₂ и O₂) в закачиваемом газе приводит к значительно более быстрому распространению газа по пласту. Во-вторых, проведено трехмерное моделирование закачки CO₂ в подземные хранилища природного газа (ПХГ) с целью замещения буферного газа сверхкритическим CO₂. Построена синтетическая 3-D модель ПХГ, в которой задано две группы скважин. Одна группа использовалась для закачки и отбора природного газа (CH₄) с целью сглаживания сезонных колебаний спроса на природный газ. А вторая группа скважин, расположенная на периферии ПХГ, использовалась только для закачки сверхкритического CO₂ на начальном этапе создания и эксплуатации ПХГ. Показано, что за счет циклического изменения направления фильтрации газов, вызванного закачкой и отбором CH₄, более половины закачанного CO₂ удается растворить в пластовой воде. При этом объем растворенного CO₂ в несколько раз больше рабочего (активного) объема ПХГ. Проведено моделирование распространения CO₂ в подземном хранилище в рамках расчета несколько сезонов закачки и отбора природного газа (CH₄). Показано, что уже через 3 сезона эксплуатации ПХГ концентрация CO₂ в отбираемом природном газе может превысить 4%, что снижает рентабельность предложенного подхода из-за необходимости сепарации CO₂ от природного газа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10051).

1. Afanasyev A., Vedeneva E. Compositional modeling of multicomponent gas injection into saline aquifers with the MUFITS simulator // 2021 J. Nat. Gas Sci. Eng. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103988
2. Søreide I., Whitson C.H. Peng-Robinson predictions for hydrocarbons, CO₂, N₂, and H₂S with pure water and NaCl brine // 1992 Fluid Phase Equil. 77, 217–240.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

А.Ж. Ахметов^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}

¹Физико-технический факультет НИ ТГУ, Томск

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

e-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

В настоящее время ввиду развития вычислительных мощностей стало возможным проводить компьютерное моделирование геотектонических процессов, таких как субдукция, коллизия, сдвиги и т.д., происходящие в литосфере Земли. На сегодняшний день существует множество теоретических моделей, где путём учёта реологических свойств, характеризующие физико-механические характеристики земной коры и верхней мантии, удаётся проводить геотектонические исследования процессов движения литосферы в ходе эволюции Земли.

В качестве объекта исследования была выбрана Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция, протяженностью 271 км и глубиной 60 км [1]. Для проведения компьютерного моделирования геотектонического процесса растяжения воспользуемся упругопластической моделью Друккера-Прагера-Николаевского и прочностной моделью «jelly sandwich», представленной на рисунке 1 (а) [2].

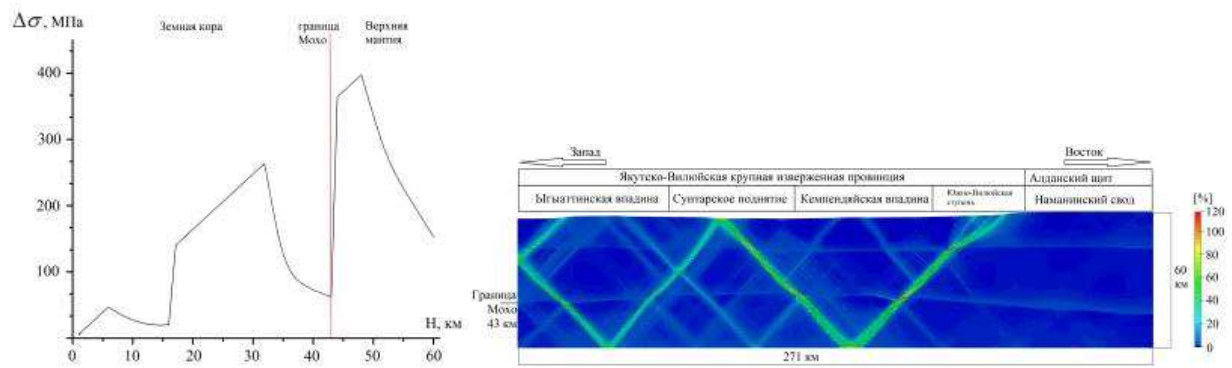


Рис 1 (а) Модель «jelly sandwich», (б) Распределение интенсивности пластической деформаций

Особенностью данной модели состоит в том, что в верхней мантии наблюдается упрочняющий слой, который находится ниже границы Мохо. Такая особенность имеет место быть в континентальных плитах ввиду менее активным геотектоническим процессам. Компьютерное моделирование была выполнена с помощью конечно-разностного метода Уилкинса.

На рисунке 1 (б) представлено распределение интенсивности пластической деформации, где максимальная локализация сосредоточена в районе верхней мантии и откуда распространяется в сторону земной поверхности, где формируются впадины и возвышенности, соответствующие геологическим областям. Распределение напряженного состояния соответствует выбранной прочностной модели. Высокая локализация сдвиговых напряжений расположены в районе границы Мохо.

Данная работа была выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-31-90034.

1. Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния Якутско-Вилуйской изверженной провинции для анализа геотектонических процессов в Сибирском кратоне // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2021. № 69. С. 53–68

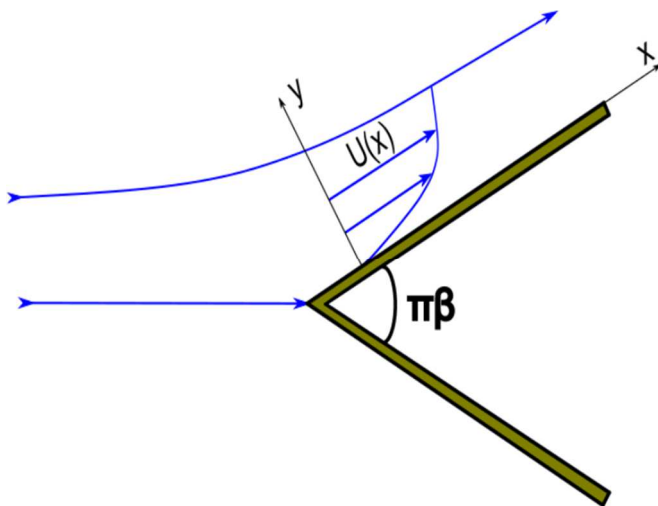
2. Burov E.B. Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. V.28. P. 1402–1443. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ НАД МОНОЛИТНЫМ ПОДАТЛИВЫМ ПОКРЫТИЕМ

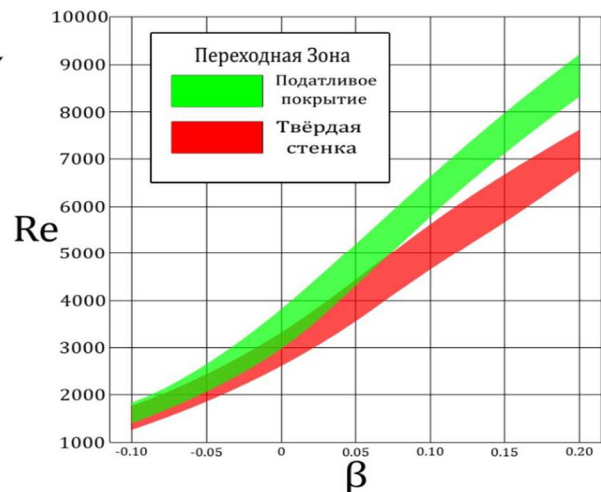
Д. А. Ашуров¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: denis.ashurov@icloud.com

В линейной постановке исследовалась устойчивость пограничных слоев Фолкнера-Скэн над монолитным податливым покрытием. Путём решения связанной линеаризованной системы уравнений Навье-Стокса и уравнений движения вязкоупругого слоя для нормальных мод определялось наименее устойчивое собственное значение. В расчётах учитывалось изменение скорости внешнего потока в продольном направлении, использовались экспериментальные зависимости свойств покрытия от частоты [1]. При помощи e^N –метода оценивалось влияние податливого покрытия на положение области ламинарно-турбулентного перехода [2]. Расчёты показывают существенное влияние покрытия на ламинарно-турбулентный переход. Так, для течений с благоприятным градиентом давления рассматриваемое покрытие увеличивает координату конца ламинарно-турбулентного перехода на 41%, по сравнению с увеличением на 32 % для пограничного слоя Блазиуса [3].



Пограничный слой с градиентом давления над податливым покрытием.



Изменение области перехода при использовании податливого покрытия, β – параметр Хартри.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20–11–20141).

1. Kulik V. M., Boiko A. V., Lee I. Using two-layer compliant coatings to control turbulent boundary layer // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. № 1. P. 47-57.
2. van Ingen J. The eN method for transition prediction. Historical Review of Work at TU Delft // 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit., Seattle, June 23-26, 2008. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (AIAA), 2008. P. 1-49.
3. Ашуров Д. А. Устойчивость и переход к турбулентности в пограничных слоях с градиентом давления над монолитным податливым покрытием // Прикладная Механика и Техническая Физика. 2021 (принято к печати).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА ПРИ ГОРЕНИИ

Н.С. Белоусова^{1,2}, О.Г. Глотов^{1,2}, А.В. Гуськов²

¹Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН), Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), Новосибирск
e-mail: nata.bel.94@mail.ru

Титан является одним из распространенных конструкционных материалов. С одной точки зрения, Ti – конструкционный материал, применяемый в экстремальных условиях (в изделиях ракетно-космической и авиационной техники [1], т. п.). С другой, Ti – пирофорное металлическое горючее. В этом качестве Ti применяется в составе пиротехнических композиций [2], и в композициях технологического горения [3]. Из-за двойного применения Ti как конструкционного материала и металлического горючего, исследования воспламенения и горения Ti проводятся и на массивных образцах, и на микрочастицах.

В экспериментах используется образец, представляющий собой полосу безметалльной матрицы с внедрёнными включениями, нанесённую на кварцевую трубку диаметром 12 мм, она играет роль держателя образца. Размеры матрицы W×L×Н примерно 3×30×2 мм. В матрице сделаны глухие отверстия диаметром 1.2 мм глубиной около 1 мм, в которых фиксируются титановые фрагменты. В волне горения матрицы каждый фрагмент превращается в горящую частицу-агломерат. Масса, состав и структура агломератов определены рецептурой и размером включений. Дальнейшее горение частиц происходит в воздухе [4, 5].

В процессе исследования были получены траекторные измерения частиц в свободном падении, такие как: скорость и координата частицы в соответствующие моменты времени, также регистрировали характерные события: начало фрагментации, конец фрагментации и конец горения.

На рис. 1а и 1б представлены результаты траекторных измерений частицы в свободном падении. В дальнейшем совокупность данных будет использована для определения коэффициента аэродинамического сопротивления горящих частиц.

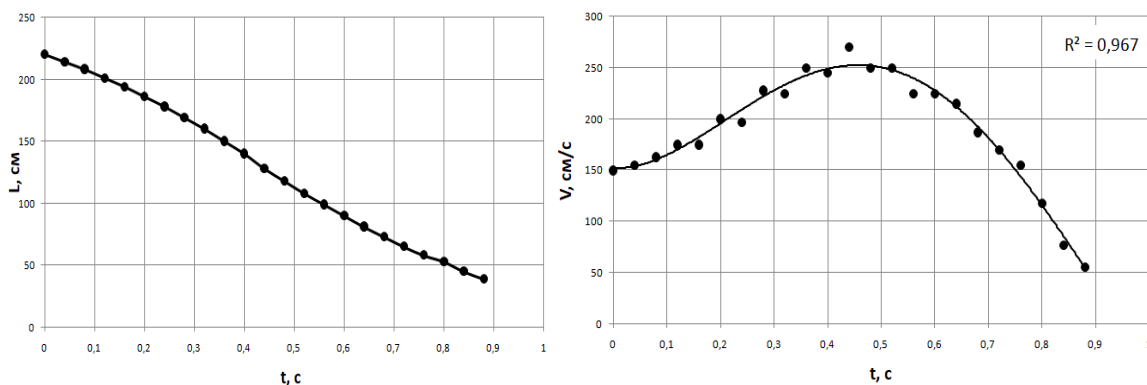


Рис. 1 а - Траектория падения частицы, б - График скорости частицы

- 1.Зубков Л. Б. Космический металл. Все о титане. – М: Наука, 1987. –129 с.
- 2.Шидловский А. А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
- 3.Мержанов А. Г., Сычев А. Е. О самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. <http://www.ism.ac.ru/handbook/shsfr.htm>
- 4.Evgeny Shafirovich, Soon Kay Teoh, Arvind Varma. Combustion of levitated titanium particles in air // Combustion and Flame.– 2008. – V.152. P. 262–271.
- 5.Belousova N.S., Glotov O.G., Guskov A.V. Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles // Journal of Physics Conference Series, Vol. 1214, No. UNSP 012010, 2019. pp. 1-7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1214/1/012010/pdf>

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ
СТОХАСТИЧЕСКИХ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**
**COMPUTATIONAL-AND-EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF
STOCHASTIC THERMAL PULSATIONS TO FATIGUE STRENGTH OF STRUCTURAL
MATERIALS**

Д.Е. Бесчеров, М.Н. Ереев, А.С. Марков, В.А. Панов, Д.Н. Свешников
АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород
e-mail: bescherov@okbm.nnov.ru

Для РУ транспортного назначения, характеризующихся высокими тепловыми нагрузками на оборудование в связи с необходимостью обеспечения повышенной мощности при минимальных габаритах и массе, вопрос оценки влияния стохастических термопульсаций на ресурс играет особую роль. Существующие методы проектирования и оптимизации новой конструкции являются эволюционными, основываясь на опыте предшествующей эксплуатации и тщательной экспериментальной отработке новых решений. Но в отношении оборудования РУ, предназначенного для длительной эксплуатации, данный подход, вследствие чрезвычайной сложности, высокой стоимости и продолжительности таких испытаний, практически не пригоден [1].

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана технология, позволяющая проводить оценку влияния стохастических термоциклических нагрузок на ресурсные характеристики оборудования РУ. Численными методами с применением суперЭВМ последовательно решаются задачи: «теплогидравлика – теплопроводность – напряженно-деформирование состояние (НДС) – ресурс».

Математические модели, применяемые в методах оценки усталостной долговечности, базируются на использовании усталостных характеристик конструкционных материалов, полученных при простом напряженном состоянии [2]. Экспериментальные данные об усталостных характеристиках материалов при термических напряжениях, локализованных на малых площадках, отсутствуют. В связи с этим, наибольший интерес представляют экспериментальные исследования кинетики накопления усталостных повреждений при максимально возможных градиентах температур теплоносителей, соответствующих штатным параметрам РУ. Для решения данной задачи АО «ОКБМ Африкантов» совместно с НГТУ им. Р.Е. Алексеева проведены исследования кинетики накопления усталостных повреждений в материале моделей в результате нагружения температурными пульсациями случайного характера, обусловленными смещением теплоносителей с различной температурой, на уникальном, специально сконструированном стенде (см. рисунок).

Для сравнения результатов эксперимента с результатами расчета была построена 3D модель экспериментального образца. Проведены теплогидравлические расчеты 3D модели, а по их результатам – расчеты НДС в условно-упругой и упругопластической постановках. По результатам расчетов НДС проведена оценка долговечности экспериментального образца при воздействии стохастических термопульсаций.

Учитывая результаты расчетов и контроля кинетики накопления усталостных повреждений в материале экспериментальной модели, были проведены её металлографические исследования, которые подтвердили достоверность результатов расчетов долговечности.

1. Отчет. Расчетно-экспериментальные исследования по развитию и верификации технологии анализа долговечности конструкций при воздействии стохастических термопульсаций. Этап 2017 года. -130 с. Н. Новгород, АО «ОКБМ Африкантов», 2017 г.

2. Методы обоснования ресурса оборудования ЯЭУ. – М.: Машиностроение, 2008. -445 с.

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ДВУХОПОРНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОДВИЖНОЙ МАССОЙ

Д.В. Бордюгов¹, Е.С. Брискин^{1,2}, Н.Г. Шаронов^{1,2}

¹Волгоградский государственный технический университет,
пр. Ленина 28, Волгоград, 400005, Россия

² Университет Иннополис, Университетская ул., 1, Иннополис,
Респ. Татарстан, 420500

e-mail: dtm@vstu.ru

Рассматривается перемещение двухопорного робота, осуществляемое следующим образом: одна из опор 1 взаимодействует с поверхностью 5 и неподвижна, условием неподвижности является смещение груза 2 [1], массой m , взаимодействующего с упругим элементом 4, относительно середины стержня AB (3) к одной из опор, в этот момент происходит ее фиксация, в то время как другая находится в фазе переноса, позволяя стержню поворачиваться вокруг неподвижной опоры. Затем происходит их смена, и робот изменяет направление вращения. В начальный момент времени задается скорость V_0 . Процесс движения подобен движению «Кельтского камня» [2].

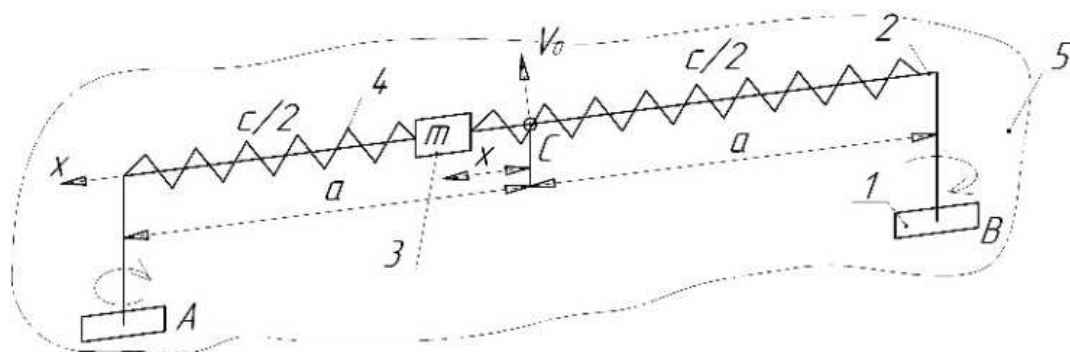


Рисунок 1. Расчетная схема двухопорного робота

Работа выполнена за счет гранта РФФИ, проект № 18-71-10069.

1. Черноусько Ф.Л. О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу // Докл. Академии Наук. 2005. Т. 405, № 1. С. 56-60.

2. Журавлёв В.Ф., Климов Д.М. Глобальное движение кельтского камня // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2008. №3. С. 8-16.

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВИБРАЦИОННЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

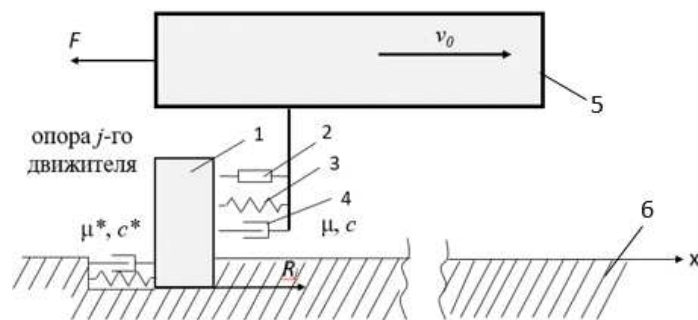
Д.В. Бордюгов¹, Е.С. Брискин^{1,2}, Н.Г. Шаронов^{1,2}

¹Волгоградский государственный технический университет,
пр. Ленина 28, Волгоград, 400005, Россия

² Университет Иннополис, Университетская ул., 1, Иннополис,
Респ. Татарстан, 420500
e-mail: dtm@vstu.ru

Исследуются способы управления движением мобильного робота с виброприводом, оказывающим периодическое силовое воздействие на движители, которые, в свою очередь, взаимодействуют с грунтом, моделируемым упруговязкой средой [1].

Управляемыми параметрами могут являться частота колебаний движителей, амплитуда колебаний движителей, амплитудное значение вынуждающей силы и скорость робота, которые являются показателями качества движения.



1 – опора движителя; 2 – силовой привод движителя;
3 – упругая связь; 4 – демпфер, 5 – корпус робота, 6 – грунт
Рисунок 1. Расчетная схема мобильного робота.

Работа выполнена за счет гранта РНФ, проект № 18-71-10069.

1. Особенности управления движением роботов с вибрационными движителями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // МКПУ–2017: матер. 10-й всерос. мультikonф. В 3 т. Т.2: тез. докл. локальной науч.-техн. конф. «Робототехника и мехатроника» (РиМ-2017) / Ростов-на-Дону; Таганрог, 2017. - С. 29-31.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПЛАЗМЫ

А.И. Брызгалов, С.Е. Якуш, А.Ф. Колесников
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
bryzgalov@ipmnet.ru

Для проведения испытаний теплозащитных материалов на термостойкость и определения их каталитических свойств в ИПМех РАН используются плазмотроны ВГУ-4 и ВГУ-3. Для нахождения химического состава и температуры на поверхности образца разрабатывается программа, позволяющая проводить расчеты сверхзвуковых и дозвуковых течений воздушной плазмы с учетом физико-химической неравновесности [1] на основе решения уравнений Навье-Стокса для диссоциированного воздуха из 11 компонентов с учетом однократной ионизации. Данная программа значительно расширяет возможности моделирования по сравнению с имеющейся программой, рассматривающей диссоциированный и ионизированный воздух как равновесную смесь. Диффузионные потоки рассчитываются из соотношений Стефана-Максвелла, коэффициенты переноса определяются согласно молекулярно-кинетической теории через интегралы столкновений. Численное решение проводится по явной схеме SLAU2 на неравномерной прямоугольной сетке со сгущением узлов к поверхности образца. Химические превращения рассчитываются на отдельном шаге решением жесткой системы ОДУ по схеме семейства Адамса с численным расчетом якобиана. В данной работе используется кинетическая схема с 32 реакциями, при этом учитывается только химическая неравновесность, а колебательная температура и температура электронов считаются равными поступательной температуре. На рисунке 1 показаны результаты моделирования разрабатываемой программой течения воздушной плазмы при сверхзвуковом обтекании цилиндрического образца с плоским торцом для условий испытаний в плазмотроне ВГУ-4.

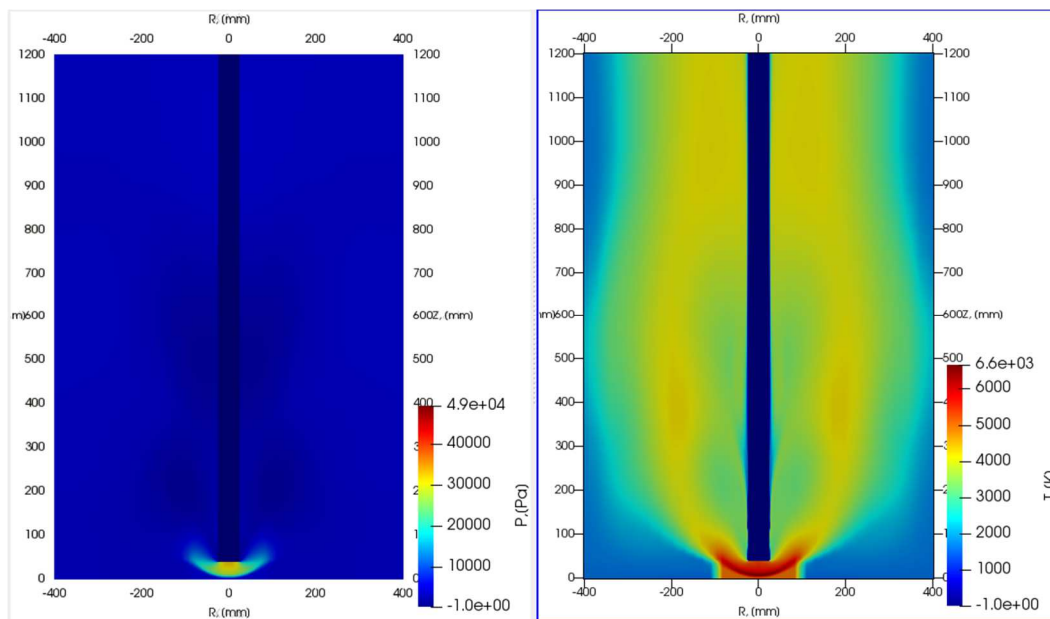


Рисунок 1. Поля давления (слева) и температуры при обтекании цилиндрического образца сверхзвуковым потоком плазмы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-31-90114.

1. Брызгалов А.И. Численное моделирование течения термически и химически неравновесного воздуха за фронтом ударной волны // Вестник МГТУ им. Баумана. 2021. №3. Т. 96. С. 94–111.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

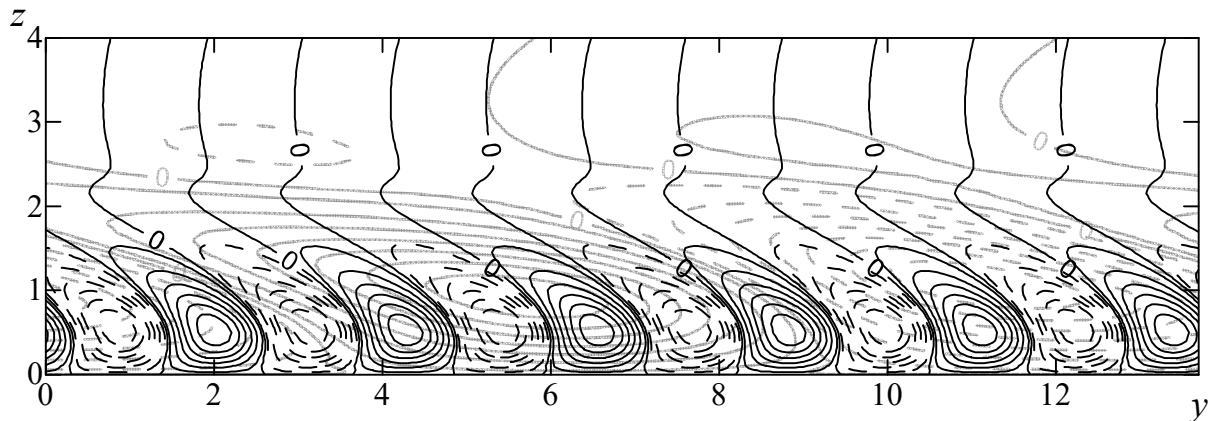
Н.В. Вазаева^{1,2}, О.Г. Чхетиани¹

¹Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва

²МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: vazaevanv@ifaran.ru

Предложена модель развития субмезомасштабных структур, которые являются следствием развития оптимальных возмущений в атмосферном пограничном слое (АПС) и связаны как со сдвигом ветра, так и с его агеострофической компонентой. Модель позволяет решить задачу об оценке масштабов, которые оказываются порядка 100-200 м по вертикали и 300-600 м по горизонтали, и ориентации стриков. Подобные масштабы характерны и для экспериментальных данных о структуре поля ветра в нижней части АПС, полученных при акустическом зондировании АПС доплеровским трехкомпонентным минисодаром высокого разрешения (ВРМС) в летний период 2017-2019 гг. на Цимлянской научной станции (ЦНС). Измерения проводились с разрешающей способностью по высоте 1 м на высотах 2-45 м с временным интервалом 1 с. Технические возможности ВРМС позволяют детально проследить развитие наблюдаемых субмезомасштабных структур (стриков), экспериментальная регистрация которых ранее не представлялась возможной. Для рассматриваемого периода измерений фиксируются кратковременные быстроразвивающиеся структуры с характерными временами 5-10 минут и масштабами 300-500 м. Эти значения оказываются близкими к полученным модельным оценкам.



Пространственное распределение продольной компоненты скорости по осям y, z , отражающее масштабы стриков, для момента времени, соответствующего максимальному значению безразмерной энергии. Отрицательные значения показаны пунктирной линией. Серые контурные линии – продольная компонента скорости установившейся мезомасштабной циркуляции при $Re = 150$.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ (проект № 20-17-00214).

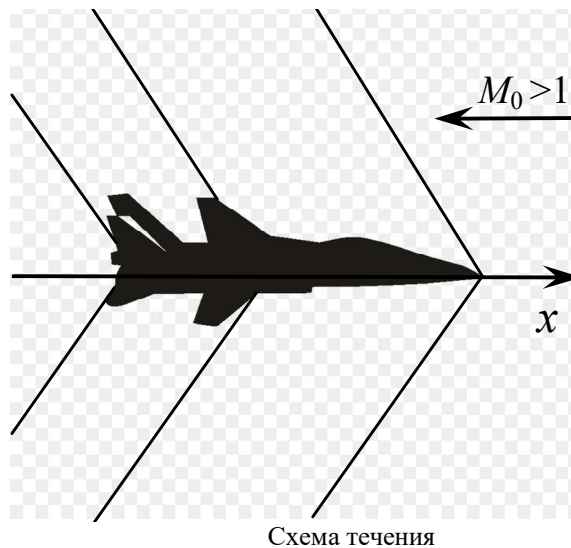
1. Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 62-75. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555562-75>

2. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Курганский М.В., & Каллистратова М.А. Спиральность и турбулентность в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. №. 1. С. 34-52. DOI: [10.31857/S0002351521010120](https://doi.org/10.31857/S0002351521010120)

К ЧИСЛЕННОМУ ИНТЕГРИРОВАНИЮ УРАВНЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ О ЗВУКОВОМ УДАРЕ

Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко, К.С. Пьянков, Н.И. Тилляева
ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва
e-mail: haris@ciam.ru

Рассматриваются возможности численных и аналитических инструментов описания звукового удара – следствия сверхзвуковой скорости летательных аппаратов. Несмотря на стремительный рост быстродействия и объема памяти компьютеров и прогресс вычислительной газовой динамики, возможности численного решения уравнений течения ограничены расчетом структур, возмущения параметров в которых не очень малы (больше 10^{-2} - 10^{-3} их значений в невозмущенном потоке). В результате, при изучении звукового удара численный расчет обтекания летательных аппаратов ограничен расстояниями в несколько их длин при удалении земной поверхности на сотни таких длин. На бóльших расстояниях используется численно-аналитический аппарат со сложными формулами – решениями линеаризованных уравнений Эйлера и главными нелинейными поправками к ним. Важный результат таких расчетов – осесимметричная асимптотика, согласно которой вдали от летательного аппарата структуры, примыкающие к головной ударной волне, затухают, как осесимметричные, свои на разных меридиональных плоскостях. В докладе с учётом опыта расчетов ударно-волновых структур перед сверхзвуковыми решетками [1] показана возможность быстрого и точного расчета ударно-волновых структур звукового удара при численном решении уравнений Эйлера без ограничений на расстояния и малую интенсивность затухающих ударных волн. Ключевую роль при этом играет адаптация разностной сетки к особенностям ударно-волновой структуры звукового удара. В известных авторам программах расчета звукового удара в приближении уравнений невязкого газа в лучшем случае удается обнаружить лишь движение в требуемом направлении (см., например, [2, 3]). Правильно адаптированных сеток нет нигде. Наконец, расчет эволюции структуры звукового удара в осесимметричном приближении с удаления в 15-20 длин летательного аппарата до земной поверхности сведен к мгновенному (доли секунды на персональном компьютере) решению задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.



Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-01-00100).

1. Ефремов Н.Л., Крайко А.Н., Пьянков К.С. и др. Ударно-волновые структуры перед неоднородной вентиляторной решеткой // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 2. 135-152.
2. Жилин Ю.Л., Коваленко В.В. О связывании ближнего и дальнего полей в задаче о звуковом ударе // Уч. зап. ЦАГИ. 1998. Т. 29. №. 3-4. С. 111-122.
3. Ordaz I., Li W. Integration of Off-Track Sonic Boom Analysis in Conceptual Design of Supersonic Aircraft // J. of Aircraft. 2014. Vol. 51. No. 1. P. 23–28.

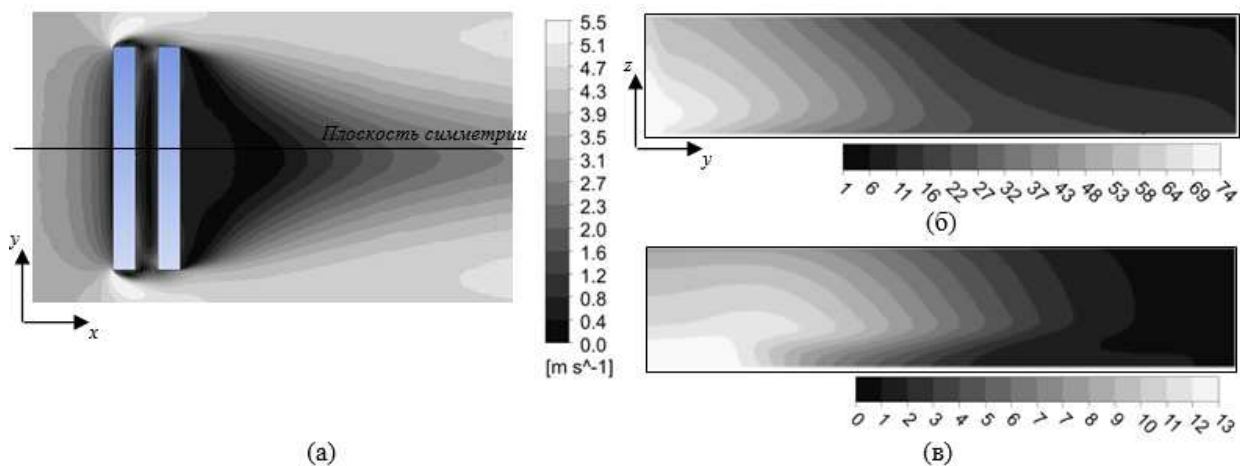
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В ОКРЕСТНОСТИ ГОРОДСКОГО КАНЬОНА

С.А. Вальгер

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
e-mail: valger@itam.nsc.ru

Прогнозирование качества воздуха в городах сегодня является актуальной задачей. Наличие низких источников загрязняющих веществ от автотранспорта в виде газовых примесей и пылевых аэрозолей в воздухе в окрестности городских застроек приводит к ухудшению экологической обстановки и негативно влияет на здоровье человека. Изучение механизмов переноса примеси в турбулентном течении воздуха в окрестности систем плохообтекаемых тел, имитирующих различные типы застройки, позволяет получить новые данные о структуре течений, распределении концентраций примеси и локальных эффектах, возникающих в потоке. Эти данные могут быть использованы для оценки качества воздуха в городских каньонах и стать основой для разработки рекомендаций об оптимальных геометрических параметрах каньона, расположении фильтрующих и заградительных экранов и других мер снижения концентраций вредных выбросов.

В настоящем исследовании численно решена задача о переносе примеси гексафторида серы SF_6 , инжектируемой через систему линейных наземных источников, в воздухе в окрестности модельной конфигурации городского каньона с соотношением размеров $W/H = 1; 2; 3$, где W – ширина каньона, H – высота каньона. Численное моделирование выполнено на основе решения 3D нестационарных уравнений Навье-Стокса, дополненных подходом DDES $k-\varepsilon$ Realizable для описания турбулентных эффектов в течении и уравнением переноса для примеси. На первом этапе, для валидации расчетной модели использованы данные эксперимента [1], в котором проведено исследование течения воздуха с примесью в модельном городском каньоне с соотношением сторон $W/H = 1$. По результатам валидации получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие данных расчета и экспериментальных данных по профилям нормализованной концентрации примеси в характерных сечениях модели. На основе численного моделирования дано описание структуры течения среды «воздух-примесь» в окрестности каньона и анализ динамики вихревых структур на различные моменты времени. На втором этапе с использованием численной модели проведено параметрическое исследование влияния соотношения размеров каньона на распределение концентраций примеси вблизи подветренной и наветренной стенок каньона. Показано, что увеличение соотношения сторон каньона W/H приводит к существенному перераспределению примеси и снижению концентраций примеси в пешеходных зонах каньона.



Поле средней скорости ветра в окрестности городского каньона $W/H=1$ в горизонтальном сечении на высоте $0.5 H$ (а) и распределения нормализованной концентрации SF_6 на стенках А (б) и В (в) каньона (относительно плоскости симметрии), полученные в расчете.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00151).

1. Gromke C., Ruck B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon- Experimental investigation of the flow and concentration field // Atmos. Environ. 2007. Vol. 41, № 16. P. 3287–3302.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА

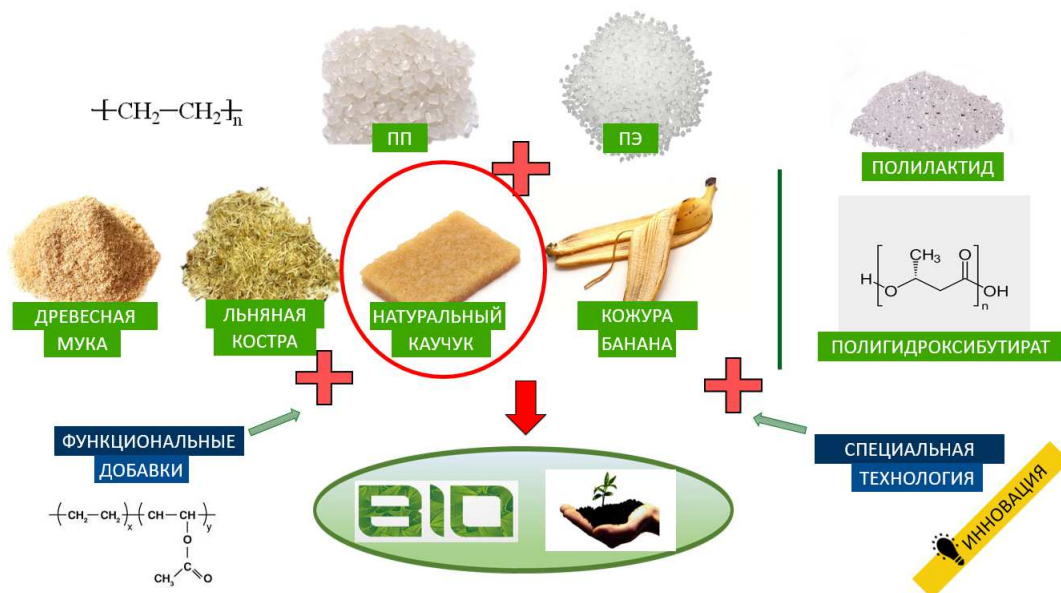
И.А. Варьян,^{1,2} Н.Н. Колесникова¹, А.А. Попов¹

¹Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

²Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва

e-mail: ivetta.varyan@yandex.ru

Полимеры пользуются большим спросом в науке, технике, сельском хозяйстве, строительстве, медицине, розничной торговле и других сферах. Однако, благодаря высокой стойкости к химическим и биологическим воздействиям синтетические полимеры в конце срока службы практически не разлагаются. Отличным решением этой проблемы могла бы стать разработка биоразлагаемых полимеров, которые при попадании в окружающую среду будут легко разлагаться обычными видами микроорганизмов. Для этого в синтетическую полимерную матрицу могут быть включены натуральные добавки. Так, в различных исследованиях предпринимались попытки создания композитов на основе полиэтилена низкой и высокой плотности с добавлением древесной и банановой муки, соевого белка, рисовой шелухи, кукурузы и др. Однако приемлемые темпы биodeградации при сохранении требуемых физико-химических свойств, а также экономически эффективная технология производства до сих пор не достигнуты.



В данной работе мы исследовали перспективы использования натурального каучука (НК) в качестве добавки к полиэтилену низкой плотности (ПЭ) с целью создания полимерного соединения для быстрой биологической деградации в почве. Полимерные соединения на основе ПЭ с содержанием НК 0 – 50 (мас. %) изготавливались путем смешивания и прессования ингредиентов при повышенных температурах с последующим быстрым охлаждением. Физические свойства полученных образцов исследовали с помощью испытаний на растяжение, оптической микроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии. Для изучения процесса биodeградации образцы помещали в лабораторную почву на 18 месяцев. По окончании испытаний образцы извлекали из почвы и исследовали. Степень деградации оценивалась путем измерения потери веса образцов. Показано, что все исследуемые образцы полимерных композитов на основе ПЭ с добавками НК обладают удовлетворительными механическими свойствами. Показано, что добавление НК значительно увеличивает скорость разложения композитов на основе ПЭ в почве. Наибольший эффект наблюдался для образцов с составом ПЭ/НК 50/50 (мас.%). Таким образом, показано, что использование натурального каучука в качестве добавки является перспективной стратегией создания биоразлагаемых материалов на основе полиэтилена сельскохозяйственного назначения.

1. Linos A., Berekaa M. and al., Biodegradation of cis-1,4-Polyisoprene Rubbers by Distinct Actinomycetes: Microbial Strategies and Detailed Surface Analysis // Applied and Environmental Microbiology, 2000, Vol. 66, No. 4, p. 1639–1645

ОБРАТНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧЕНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Я.А. Вахтерова^{1,2}, Г.В. Федотенков^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: yana-vahterova@mail.ru

Основной целью исследований является получение решений новых нестационарных обратных задач для упругих стержней. Задачей данного исследования является разработка и реализация новых методов, подходов и алгоритмов решения нестационарных обратных задач механики стержней. Прямая нестационарная задача для упругого стержня состоит в определении упругих перемещений, которое удовлетворяет заданному уравнению нестационарных колебаний в частных производных и некоторым заданным начальным и граничным условиям. Решение обратной задачи с неизвестным законом изменения площади поперечного сечения, базируется на методе функций влияния. С его применением обратная задача сводится к решению системы интегральных уравнений типа Вольтера I-го рода по времени относительно искомой площади поперечного сечения упругого стержня. Для его решения используется метод механических квадратур в сочетании с алгоритмом регуляризации Тихонова.

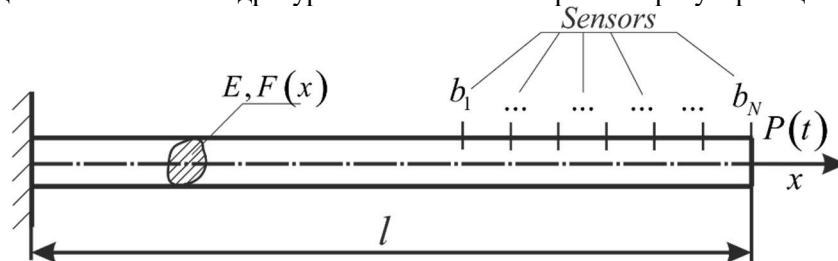


Рис. Схема нагружения для стержня

Рассматривается упругий изотропный стержень конечной длины, левый конец которого жестко закреплён, правый конец стержня свободный. На свободном конце стержня приложена сосредоточенная нагрузка, зависящая от времени. Стержень имеет переменную площадь поперечного сечения, в котором закон распределения по координате неизвестен и подлежит идентификации в процессе решения обратной задачи. Предполагается, что в некоторой окрестности свободного конца стержня перемещения известны. На практике эта информация может поступать с датчиков измерения продольных перемещений, установленных в нескольких сечениях в окрестности свободного конца стержня. Для построения метода решения обратной задачи требуется сначала получить решения прямой задачи, в которой площадь известна и требуется определить нестационарные перемещения для упругого стержня.

В основу методики решения прямой задачи положен принцип суперпозиции, при котором перемещения и контактные напряжения связаны посредством интегрального оператора по пространственной переменной и времени. **Ошибка! Источник ссылки не найден.-1.** Его ядром является функция влияния для упругого стержня. Эта функция представляет собой фундаментальное решение дифференциального уравнения движения исследуемого стержня. Функция влияния находится с помощью преобразования Лапласа по времени и разложения в ряд Фурье по системе собственных функций.

В обратной задаче требуется, по данным, полученным с датчика, найти переменную площадь поперечного сечения. Решение обратной задачи сводится к решению системы независимых интегральных уравнений Вольтера I-го рода, которая является некорректной по Ж. Адамару вследствие вырожденности ядер интегральных операторов. Для регуляризации обратной задачи применяется метод Тихонова, приводящий к системе интегральных уравнений с невырожденными ядрами.

Для решения системы разрешающих интегральных уравнений разработан и реализован на ЭВМ численно-аналитический алгоритм, основанный на методе средних прямоугольников в сочетании с методом регуляризации Тихонова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90043.

1. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. *Волны в сплошных средах*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 472 с.

2. Vahterova Y. A., Fedotenko G. V. The inverse problem of recovering an unsteady linear load for an elastic rod of finite length // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2020. – Vol. 18, no. 4. – P. 687–692.

АБСОЛЮТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЯХ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

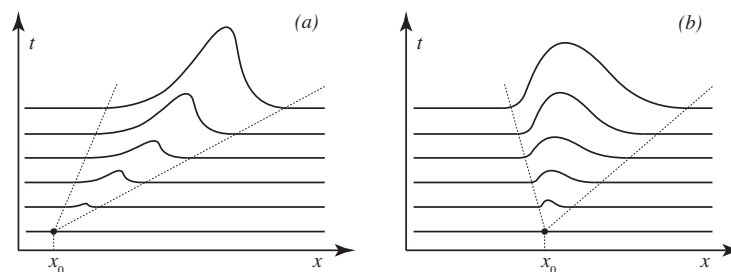
В.В. Веденеев^{1,2}

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

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

e-mail: vasily@vedeneev.ru

Абсолютный или конвективный характер неустойчивости сдвиговых течений оказывает большое влияние на развитие возмущений, в том числе на возможность реализации ламинарных течений на практике. Неустойчивость в однонаправленных затопленных струях, вызванная точкой перегиба в профиле скорости, обычно считается конвективной, хотя строго это было доказано лишь для одного конкретного семейства профилей как для плоских [1], так и для круглых [2] струй. Недавно в невязком приближении было показано [3], что существуют условия, в которых неустойчивость круглой струи без возвратного течения становится абсолютной. А именно, были установлены два фактора, управляющих характером неустойчивости – величина скорости в точке перегиба профиля скорости и «крутизна» профиля скорости в точке перегиба – и продемонстрирован профиль скорости, в котором сочетание этих факторов приводит к смене конвективного характера неустойчивости на абсолютный.



Поведение во времени локализованного возмущения в конвективно (а) и абсолютно (б) неустойчивой струе.

В настоящей работе этот вопрос исследуется с учётом вязкости. В плоскопараллельном приближении исследуется плоская затопленная струя несжимаемой жидкости, задаваемая профилем осевой скорости $U(y)$. Рассматривается семейство параметризованных профилей, обеспечивающее гладкий переход от “классического” профиля скорости с единственной точкой перегиба, скорость в которой равна половине максимальной скорости, к профилю скорости, неустойчивость которого в невязком приближении абсолютна. Численным решением задачи на собственные значения для уравнения Рэлея (в невязком приближении) или Орра-Зоммерфельда (с учётом вязкости) анализируется положение седловой точки в комплексной плоскости функции $\omega(\alpha)$, где ω – комплексная частота, α – комплексное волновое число. На первом этапе продемонстрировано, как в невязком приближении происходит движение седловой точки при гладкой деформации профиля скорости и, соответственно, смена конвективного характера неустойчивости на абсолютный.

На втором этапе для профилей скорости, абсолютно неустойчивых в невязком приближении, показано, что с учётом вязкости неустойчивость снова становится конвективной, если число Рейнольдса ниже некоторого критического значения. Найдена зависимость этого критического числа Рейнольдса от профиля скорости и показано, что оно может быть достаточно низким, при котором в экспериментах наблюдаются ламинарные участки струй. Обсуждаются возможные способы создания абсолютно неустойчивых струй и их возможные применения в технике.

Работа поддержана грантом РФФ № 20-19-00404.

1. Huerre P., Monkewitz P.A. Absolute and convective instabilities in free shear layers // J. Fluid Mech. 1985. V.159. P. 151-168.
2. Abid M, Brachet M, Huerre P. Linear hydrodynamic instability of circular jets with thin shear layers // Eur. J. Mech. B/Fluids. 1993. V.12(5). P. 683-693.
3. V. Vedeneev, J. Zayko. On absolute instability of free jets // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1129. 012037.

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ МАКРОМОЛЕКУЛ И НАНОЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛЫ

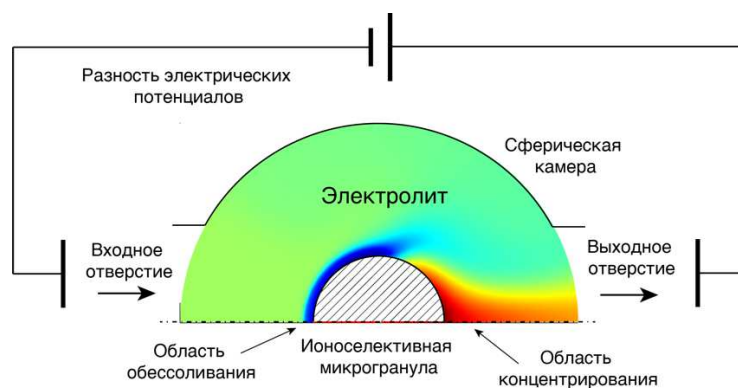
Г.С. Ганченко, М.С. Алексеев

Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Проблема малых концентраций аналита в пробах биологических жидкостей существенно ограничивает использование микропроб для проведения медицинских и химических анализов. Это связано с тем, что концентрация исследуемых веществ, например молекул ДНК или пептидов, очень мала и в микромасштабах в области детектора статистически может не оказаться ни одной исследуемой частицы, что существенно снижает чувствительность детектора и приводит к ложноотрицательным результатам анализов.

Для решения этой проблемы можно использовать электрокинетические эффекты в жидкостях, которые наиболее сильным образом проявляются около ионоселективных поверхностей. В докладе будут представлены результаты численного моделирования процессов самофокусировки взвешенных макромолекул и наночастиц около ионоселективной микросферы. Численные расчеты представляют собой моделирование микроустройства, которое состоит из сферической внешней камеры с помещенной внутрь ионоселективной микрогранулой. В системе также имеется поток жидкости, который возникает как за счет электроосмоса, так и за счет внешнего градиента давления. Экспериментальные результаты исследования аналогичных устройств можно найти в работах [1,2]. Процесс самофокусировки аналогичен процессу образования концентрационной струи в задаче электрофореза [3], поэтому моделируемое устройство можно использовать не только для концентрирования частиц около микрогранулы, но и для создания расслоенного потока, который уносится из выходящего отверстия.



Изображение расчетной области и характерных областей.
Цвет на фоне соответствует плотности концентрации

Исследование показало, что степень концентрирования увеличивается с увеличением напряженности внешнего электрического поля, однако начиная с некоторого критического значения напряженности стационарное течение теряет устойчивость [3], что негативно влияет на процесс концентрирования. Таким образом, существуют оптимальные значения управляющих параметров, при которых можно добиться максимального концентрирования макромолекул и наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 20-79-00044.

1. Wang S.-C., Wei H.-H., Chen H.-P., Tsai M.-H., Yu C.-C., Chang H.-C. Dynamic super-concentration at critical-point double-layer gates of conducting nanoporous granules due to asymmetric tangential fluxes // *Biomicrofluidics*. 2008. Vol. 2, No. 1. P. 014102.

2. Wang S.-C., Lai Y.-W., Ben Y., Chang H.-C. Microfluidic Mixing by dc and ac Nonlinear Electrokinetic Vortex Flows // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2004. Vol. 43. No. 12. P. 2902–2911.

3. Ganchenko G.S., Frants E.A., Amiroudine S., Demekhin E.A. Instabilities, bifurcations and transition to chaos in electrophoresis of charge-selective microparticle // *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32, No 5. P. 054103.

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ВЯЗКОЭЛАСТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Г.С. Ганченко¹, В.А. Попов², Р.Р. Пономарев², Е.А. Демехин^{1,3}

¹Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

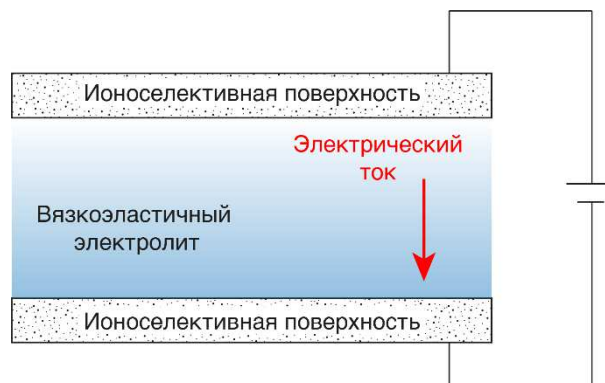
²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

³НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

В наше время наблюдается активное внедрение ионоселективных поверхностей в устройства медицинской и химической диагностики. Это связано с тем, что около ионоселективных поверхностей, под действием электрического поля образуется существенный объемный заряд и наблюдается концентрационная поляризация. Данные эффекты приводят к тому, что электрокинетические эффекты значительно усиливаются. Так, например, около ионоселективных поверхностей возможен электроосмос второго рода, который характерен квадратичной зависимостью скорости течения жидкости от напряженности внешнего поля, в то время как около непроницаемых диэлектрических поверхностей возможен только электрофорез первого рода, который отличается всего лишь линейной зависимостью.

Несмотря на очевидные преимущества ионоселективных поверхностей их использование затруднено проявлением различных неустойчивостей, в том числе электрокинетической неустойчивости [1]. На данный момент механизм электрокинетической неустойчивости в ньютоновских жидкостях изучен достаточно подробно [2], но попытки использования этого эффекта для биологических жидкостей приводили к неожиданным результатам. Нестыковки могут быть связаны с неньютоновскими свойствами биологических жидкостей. Работы по исследованию электроконвекции в неньютоновских жидкостях стали появляться совсем недавно [3], в них показано, что вязкоэластичные свойства жидкостей могут существенно влиять на электроконвекцию, однако сам механизм еще плохо изучен.



Схематическое изображение простейшей исследуемой ячейки заполненной ньютоновским электролитом.

Наше исследование посвящено линейному анализу устойчивости стационарного решения и поиску критических значений параметров, то есть в те моменты, когда неустойчивость только начинает проявляться. Изучение электрокинетической неустойчивости именно около критических значений напряженности внешнего электрического поля позволяет понять ее особенности в вязкоэластичных электролитах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, грант для молодых кандидатов наук МК-259.2021.1.1

1. Rubinstein I., Zaltzman B. Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // *Physical Review E*. 2000. Vol. 62, No 2. P. 2238–2251.

2. Demekhin E. A., Ganchenko G. S., Kalaydin E. N. Transition to electrokinetic instability near imperfect charge-selective membranes // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30, No 8. P. 082006.

3. Li G., Archer L. A., Koch D. L. Electroconvection in a Viscoelastic Electrolyte // *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 122, No 12. P. 124501.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ СТОПОХОДЯЩЕЙ МАШИНЫ С ВЕТРОПРИВОДОМ

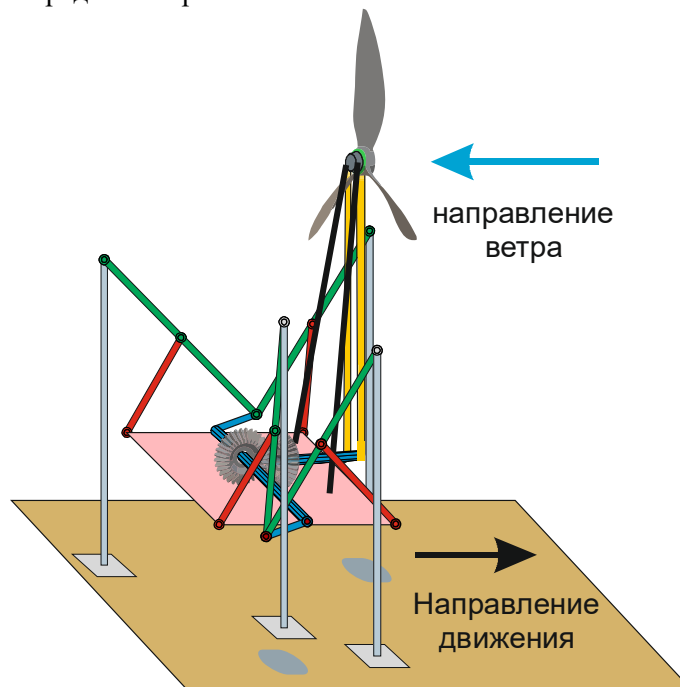
М.А. Гарбуз^{1,2}

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

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

e-mail: misha-garbuz@yandex.ru

Рассматривается задача о движении стопоходящей машины Чебышева [1] с пропеллерной ветротурбиной по абсолютно шероховатой горизонтальной плоскости в стационарном потоке ветра, направленном вдоль линии движения корпуса. Ветроприёмная установка преобразует энергию ветра в энергию вращения и передаёт её рабочему валу стопоходящей машины (рис.). Другие источники энергии отсутствуют. Целевым режимом является режим, при котором корпус машины перемещается против ветра с постоянной средней скоростью.



Стопоходящая машина с ветроприводом

Детально описана кинематика стопоходящего механизма. В частности, показано, что вертикальные смещения центра масс на два порядка меньше характерного размера механизма. Описаны дополнительные допущения, которые позволяют рассматривать механизм как систему с одной степенью свободы.

При описании динамики системы использована квазистатическая модель аэродинамического воздействия [2].

Построена математическая модель, составлены уравнения движения в форме динамической системы второго порядка. Исследованы установившиеся режимы движения, найдены неподвижные точки и условия их устойчивости. Показано, что в некотором диапазоне параметров существует притягивающий установившийся режим движения, при котором корпус машины перемещается против ветра. Проанализировано влияние коэффициента лобового сопротивления корпуса.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка методов исследования управляемых механических систем, взаимодействующих со сплошной средой» (АААА-А19-119012990123-0).

1. Чебышев П.Л. Избранные труды. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1955. 929 с.

2. Локшин Б.Я., Привалов В.А., Самсонов В.А. Введение в задачу о движении тела в сопротивляющейся среде. М.: Изд-во МГУ, 1986. 86 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДАЛЬНОЙ И АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА

Л.Р. Гареев¹, В.В. Веденеев¹, Ю.С. Зайко², А.И. Решмин², В.В. Трифонов²

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

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

e-mail: gareev.lr@yandex.ru

В линейной теории устойчивости пристенных сдвиговых потоков лишь несколько классических результатов были подтверждены экспериментально, например, пограничный слой Блазиуса [1], течение Пуазейля в круглой трубе [2], плоское течение Пуазейля [3]. Устойчивость ламинарных затопленных струйных течений и рост возмущений в них изучены гораздо меньше из-за низких критических чисел Рейнольдса Re_{cr} и из-за быстрого перехода к турбулентности. Но недавно был предложен новый метод создания ламинарных струй воздуха диаметром $D = 120$ мм, сохраняющих ламинарную структуру на расстоянии более $5.5D$ от выходного сечения для Re в диапазоне 6000–10000 [4].

Для данного течения была проведена серия экспериментов, направленная на исследование развития осесимметричных возмущений, вызванных низкочастотными колебаниями металлического кольца двух диаметров (положения колец соответствуют точкам перегиба профиля скорости). При помощи визуализации лазерным ножом и построения корреляционных картин были определены длины образующихся волн, радиальное распределение амплитуды пульсаций скорости, пространственная скорость роста пульсаций. Полученные результаты согласуются с теоретическими расчетами, проведенными в рамках модальной теории.

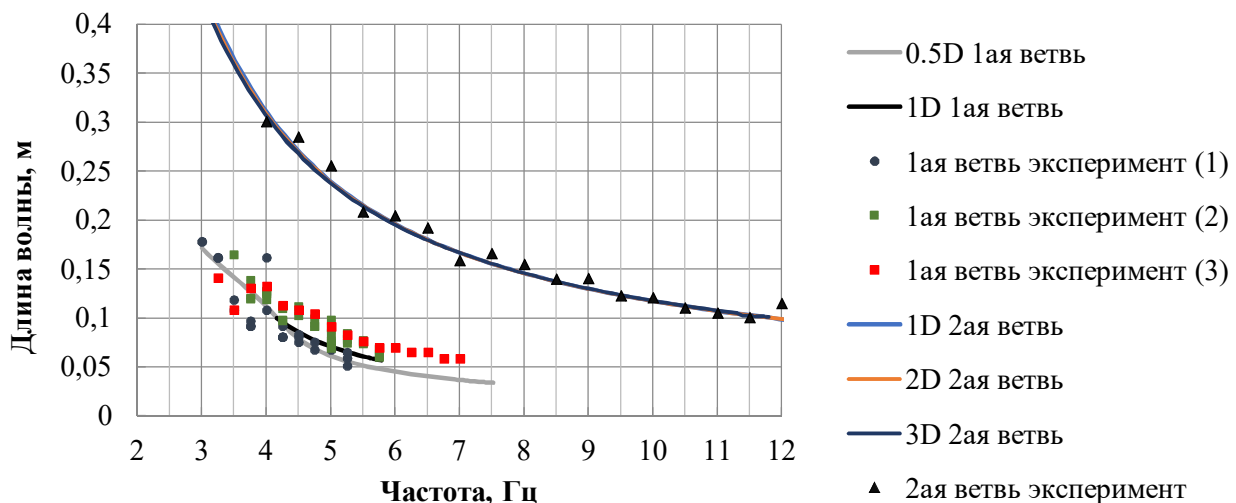


Рис. Сравнение теоретических и экспериментальных длин образующихся волн двух ветвей растущих возмущений

Помимо внесения в струю возмущений с заданной частотой, была проведена серия экспериментов с дефлекторами различных конфигураций с целью внесения стационарных возмущений, способствующих развитию алгебраической неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-19-00404.

1. A.V. Boiko, K.J.A. Westin, B.G.B. Klingmann, V.V. Kozlov, P.H. Alfredsson. Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. Part 2. The role of TS-waves in the transition process // *J. Fluid Mech.* 281, 1994. P. 219–245.

2. Pfenniger, W. Transition in the inlet length of tubes at high Reynolds numbers // *Boundary layer and flow control* (ed. G. Lachman), Pergamon, 1961. P. 970–980.

3. Козлов В.В., Рамазанов М.П. Экспериментальное исследование устойчивости течения Пуазейля // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.* № 8. Вып. 2, 1981. С. 45–48.

4. Julia Zayko, Sergei Teplovodskii, Anastasia Chicherina, Vasily Vedeneev, Alexander Reshmin. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // *Phys. Fluids* 30(043603), 2018.

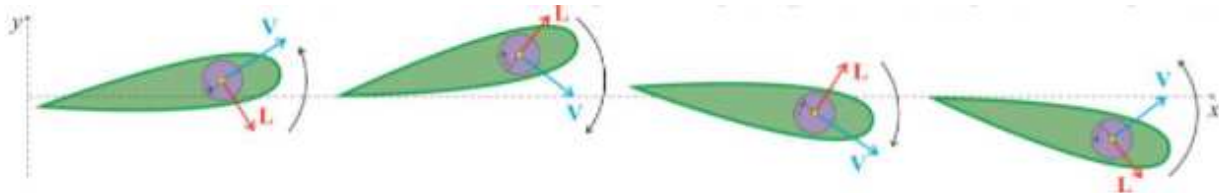
ПОДВОДНЫЙ КАПСУЛЬНЫЙ РОБОТ, УПРАВЛЯЕМЫЙ ДВИЖЕНИЕМ ОДНОГО МАХОВИКА

С.А. Голованов

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: serj-great@mail.ru

Введение. Исследование капсульных водных роботов – одна из актуальных проблем современной науки. Такие роботы могут применяться даже в медицинских целях. Подробный обзор исследований жидких капсульных роботов можно найти в [1]. Среди классических результатов в этой области можно отметить такие работы, как [2,3].

Описание системы. Исследуется подводный капсульный робот с одиночным внутренним маховиком. Робот совершает плоскопараллельное движение. Таким образом, система имеет четыре степени свободы и один управляющий вход. Математическая модель построена в виде динамической системы 5-го порядка. Для этого применяется квазистатическая модель взаимодействия с жидкостью. Эта модель позволяет не только проводить эффективный параметрический анализ, но и выявлять особенности движения, связанные с наличием боковой составляющей гидродинамической силы. Построена стратегия управления.



Результаты. Показано, что боковая сила обеспечивает возможность необратимого движения центра масс в желаемом направлении. Таким образом, перспективно создание подводных капсульных роботов и алгоритмов управления ими на основе использования боковой силы. Результаты моделирования подтверждены экспериментами с прототипом капсульного робота. Подтверждено качественное соответствие модели и экспериментов.

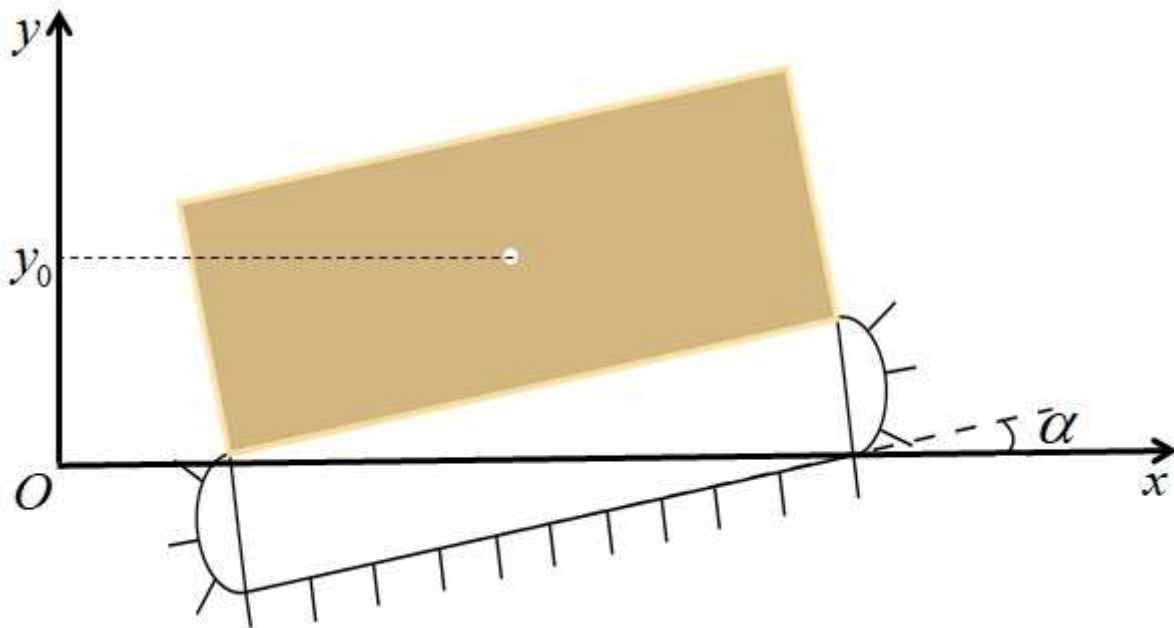
Ключевые слова: подводный робот, движение внутренней массы, квазистатическая модель.

1. Kilin A. A., Klenov A. I., Tenenev V. A. Controlling the movement of the body using internal masses in a viscous liquid // Computer Research and Modeling. 2018. V. 10(4). P. 445–460.
2. Козлов В.В., Рамоданов С.М. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости // ПММ. 2001. Т. 65. Вып. 4. С. 592–601.
3. Chernousko F.L. The optimal periodic motions of a two-mass system in resistant medium // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2008. V. 72. No 2. P. 116–125.

ДВИЖЕНИЕ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНКИ ПО ВОДЕ

А.В. Бойко, А.П. Голуб, В.А. Ерошин
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: holub.imech@gmail.com

Движение по воде наземных транспортных средств вызывает большой интерес. Они не только являются амфибиями, то есть могут двигаться одновременно по воде и по суше, но и при движении по воде значительно экономят топливо. В работе рассматривается машинка с гусеницей, которая оснащена грунт зацепами и при взаимодействии с водой создаёт тягу больше, чем колесо. Рассматривается плоскопараллельное движение, и во всё время объект наклонён к горизонтальной поверхности под некоторым постоянным углом (в данной задаче рассматривались малые углы наклона). Таким образом, имеется две степени свободы – это координаты центра масс. Вертикальная указывает, насколько машинка погружена в воду, изменение горизонтальной координаты – линейную скорость. Эти два параметра будут основными при изучении движения данного объекта.



Гусеничная машинка, двигающаяся по воде (вид с боку).

На машинку действуют сила тяжести, подъёмная сила, и сила сопротивления со стороны воды на её погружённую часть, а также тяга создаваемая гусеницей. В модели учитывается погружение машинки, это приводит к изменению сил, связанных с взаимодействием с водой. Тяга и подъёмная сила моделируются на основе данных экспериментов, которые проводились на водоканале НИИ механики МГУ. Дана оценка начальной скорости и угловой скорости вращения гусеницы, при которой машинка не будет тонуть. Приведены результаты моделирования и получен диапазон значений, при которых возможно движение по поверхности воды.

1. Boyko A.V., Golub A.P., Yeroshin V.A., Samsonov V.A. Hydrodynamics of new high-speed surface systems // Journal of Physics: Conference Series.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ АДИАБАТИЧЕСКОЙ СТЕНКИ, ОБТЕКАЕМОЙ СВЕРХЗВУКОВЫМ РАСШИРЯЮЩИМСЯ ГАЗОКАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

И.В. Голубкина, А.Н. Осипцов
НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: giv-mm@mail.ru

Исследуется сверхзвуковое стационарное течение газочастицной смеси в плоском линейно расширяющемся канале с теплоизолированными стенками. Для анализа структуры течения и теплообмена используется двухконтинуальная модель газочастицной среды с пренебрежимо малой объемной концентрацией дисперсной фазы [1]. Учитываются фазовые переходы на поверхности каплей. Предполагается, что во входном сечении канала фазы находятся в состоянии равновесия, а температура жидкости на поверхности и внутри каплей не меняется во всей рассматриваемой области. Численно исследуется характер течения как в невязком ядре потока, так и в двухфазном пограничном слое.

Для определения параметров фаз вдали от стенки решаются квазиодномерные невязкие уравнения двухфазной среды с учетом обратного влияния и процесса конденсации. Показано, что температура газа вдоль оси канала меняется немонотонно: сначала температура снижается за счет падения давления в расширяющемся потоке, затем растет за счет конденсации. Разница температур фаз определяет скорость увеличения радиуса каплей. Найдены условия, при которых происходит наиболее интенсивный рост каплей.

Моделирование течения вблизи плоской стенки осуществляется с использованием уравнений ламинарного сжимаемого газочастицного пограничного слоя [2]. В пристеночной области помимо силы сопротивления Стокса учитывается боковая сила Сэфмана, приводящая к осаждению каплей, в результате чего на поверхности стенки может формироваться тонкая пленка. В зависимости от свойств фаз и состояния потока во входном сечении канала возможны различные режимы обтекания стенки: полное отсутствие пленки, наличие пленки на конечном участке стенки, наличие непрерывной монотонно растущей пленки. Найдены диапазоны определяющих параметров, соответствующие каждому из режимов. Показано, что даже при массовой концентрации каплей в набегающем потоке порядка 1% можно получить снижение температуры стенки в 1.5 раза и более. Полученные в данной работе количественные оценки снижения температуры стенки могут быть использованы при разработке систем безмашинного энергоразделения по методу Леонтьева [3].

Исследование выполнено по открытому плану МГУ за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00234).

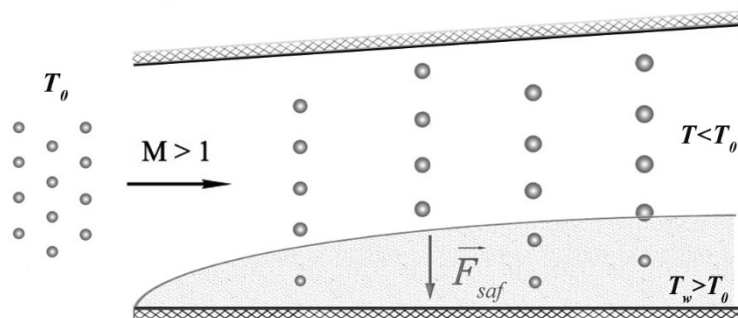


Схема течения

1. Marble F.E. Dynamics of dusty gases // Annu. Rev. Fluid Mech. 1970. V. 2. P. 397-446.
2. Osipov A.N. Mathematical modeling of dusty-gas boundary layers // Appl. Mech. Rev. 1997. V. 50. P. 357-370.
3. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157-159.

ГРАНИЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В.П. Первадчук¹, Д.Б. Владимирова¹, И.В. Гордеева¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: gordeevai@pstu.ru

Производство кварцевых оптических волокон – сложное высокотехнологичное дорогостоящее производство, поэтому задача об оптимальном стабилизирующем управлении этим процессом является актуальной в течении уже нескольких десятилетий.

Численная реализация решения системы оптимальности для задачи оптимального управления процессом вытяжки кварцевых оптических волокон [1] проводилась с использованием метода конечных элементов в пакете мультифизического моделирования Comsol Multiphysics. Процесс решения данной системы можно разделить на нескольких этапов:

- поиск стационарного решения (функций $R_{st}(z)$, $V_{st}(z)$ и $T_{st}(z)$);
- нахождение функций $\alpha_1(z)$, $\alpha_2(z)$, $\alpha_3(z)$, $\alpha_4(z)$, $\beta_1(z)$, $\beta_2(z)$, $\beta_3(z)$, $\varphi_1(z)$, $\varphi_2(z)$, $\varphi_3(z)$, $\varphi_4(z)$, зависящих от стационарных состояний;
- непосредственное решение системы оптимальности и отыскание функции оптимального управления;
- анализ полученных результатов.

Значения параметров, входящих в систему, описывающую процесс вытяжки оптических волокон, а также в систему оптимальности, представлены в [2]. Для решения системы оптимальности возмущение радиуса волокна от его стационарного состояния задавалось в виде, представленном на рис. 1. Максимальное отклонение радиуса волокна составило 2%. На рис. 2 представлена полученная функция управления $\tilde{V}(t, L)$. Ее максимальное значение +7%, что соответствует реальным возможностям производства. Для анализа эффективности управления были найдены функции отклонения радиуса готового волокна для двух разных режимов вытяжки (в точке $z = L$): без управления – сплошная линия 1 и с управлением – пунктирная линия 2 (рис. 3). Отметим, что процесс имеет тенденцию к стабилизации уже со 2 секунды, а концу 6 секунды – стабилизируется полностью, т.е. отклонение функции радиуса готового волокна равно нулю.

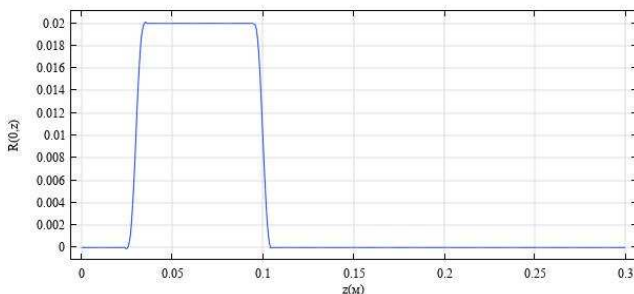


Рис. 1

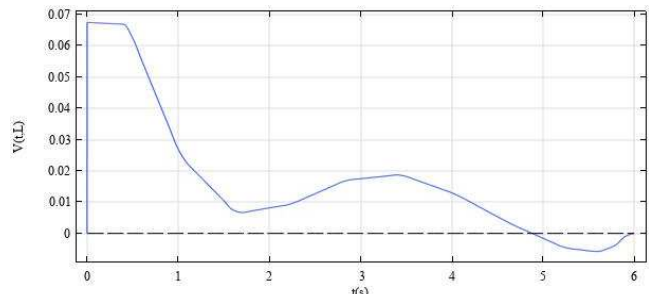


Рис. 2

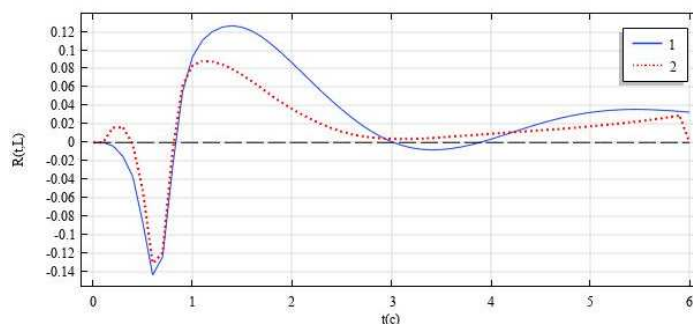


Рис. 3

1. Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Гордеева И.В. Оптимальное стабилизирующее управление процессом вытяжки оптического волокна в условиях неизотермичности // Фотон-Экспресс. 2019. Т. 158, № 6. С. 371-372.

2. Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Гордеева И.В. Граничное управление распределенной системой в задачах вытяжки кварцевых оптических волокон // Вычислительная механика сплошных сред (Computational continuum mechanics). 2018. Т. 11, № 4. С. 388-396.

СТАЦИОНАРНОЕ ИСТЕЧЕНИЕ СМЕСИ ГАЗ-ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ ИЗ ПЛОСКОГО КАНАЛА

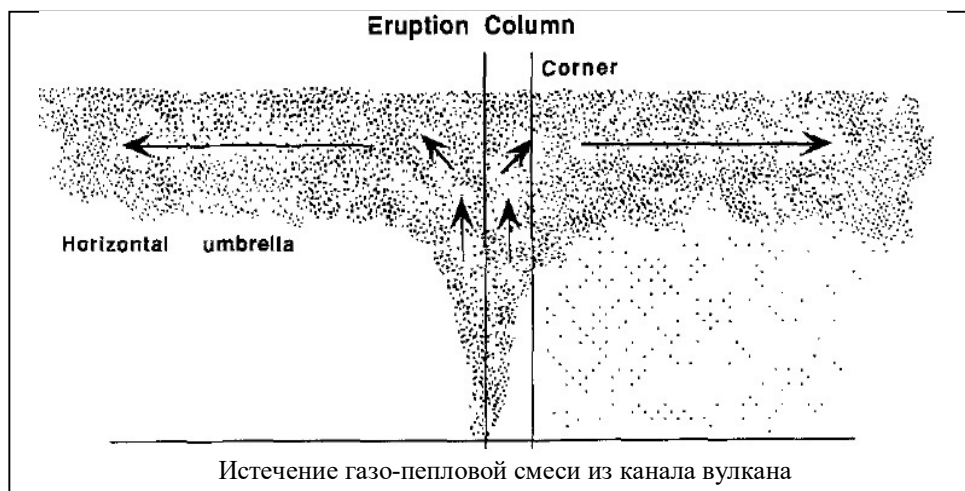
Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: GorokhovaNV@imec.msu.ru

Истечение газо-пепловой смеси из жерла вулкана – существенно неоднородный турбулентный процесс. Однако при достаточно длительном сохранении расхода смеси течение можно считать стационарным. Наиболее простой моделью, описывающей истечение газа (жидкости) из канала, является модель затопленной струи [1].

В этой работе исследуется стационарное плоское течение смеси газ – заряженные частицы в случае плоской стационарной затопленной струи несжимаемой жидкости в предположении, что движение частиц не влияет на течение несущей среды. Расход потока частиц, протекающего через сечение канала, предполагается постоянным (ранее рассматривалось движение фиксированного количества частиц [2]). Предполагается, что смесь состоит из частиц двух различных диаметров. При этом средняя концентрация частиц и доля крупных частиц на выходе из канала – варьируемые величины. Для описания движения частиц используется подход Лагранжа; частицы движутся под действием силы тяжести, гидродинамических и электростатических сил. При взаимодействии (соударении) частиц меняются их скорости и заряды [3]. Рассматривается зона течения, близкая к каналу. Проводится детальное исследование влияния параметров начального распределения на течение смеси и эволюцию электрического поля. Определяются количественные характеристики электрического поля (накопленный частицами заряд, максимальная напряжённость электрического поля и другие) в зависимости от параметров распределения. Оценивается ширина канала и начальная концентрация частиц, при которых напряжённость поля достигает критических значений самостоятельного разряда.



Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00028 А.

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй // Репринтное воспроизведение издания 1960 г. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 720 с.

2. Горохова Н. В. Эволюция электрического поля в течениях смеси газа с заряженными частицами // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. РИЦ БашГУ Уфа, 2019. Т. 4. С. 31–33.

3. Soo S.L. Dynamics of charged suspensions // International reviews in aerosol physics and chemistry. V. 2. Pergamon Press, Oxford. 1971. P. 61–149.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СМЕСИ ГАЗ - ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

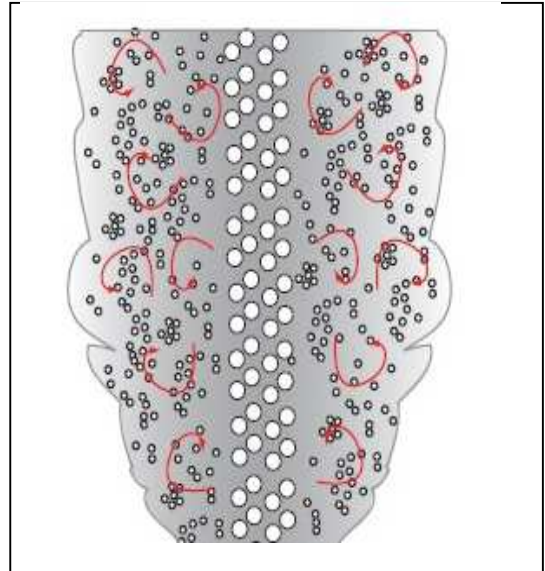
Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: GorokhovaNV@imec.msu.ru

При крупных взрывных извержениях часто наблюдаются электрические разряды в пепловой колонне, возникающие в результате электризации частиц пепла. Одними из основных причин электризации частиц являются их трение и столкновение. Взаимодействие частиц существенно возрастает в сильно неоднородном течении. Причем существенное влияние на передачу и накопление заряда оказывает различие в размерах и свойствах частиц.

В этой работе разрабатывается модуль для расчета плоского нестационарного течения смеси газ – заряженные частицы с использованием построенной ранее модели их взаимодействия [1]. При описании движения частиц используется подход Лагранжа; частицы движутся под действием силы тяжести, гидродинамических и электростатических сил; взаимодействуют друг с другом с изменением скоростей движения и зарядов [2]. Предполагается, что движение частиц не влияет на течение несущей среды, поэтому течение несущей среды может быть рассчитано отдельно. Расчет проводится с использованием модельного нестационарного течения.



Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00028 А.

1. Горохова Н. В. Эволюция электрического поля в течениях смеси газа с заряженными частицами // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. РИЦ БашГУ Уфа, 2019. Т. 4. С. 31–33.

2. Soo S.L. Dynamics of charged suspensions // International reviews in aerosol physics and chemistry. Vol. 2. Pergamon Press, Oxford. 1971. P. 61–149.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ДИЛАТАЦИОННОЙ НИТИ В УПРУГОМ КЛИНЕ

Ж.В. Гудкина^{1,2}, М.Ю. Гуткин^{2,3,4}, С.А. Красницкий^{2,3,4}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²СПБПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург

e-mail: gudkinazhanna@mail.ru

Исследование деформаций и напряжений несоответствия, связанных с полупроводниковыми наногетероструктурами сложной архитектуры, является важной проблемой материаловедения и наномеханики. Эти деформации и напряжения определяются различиями параметров решетки и коэффициентов теплового расширения контактирующих материалов, а также их химическими неоднородностями. Снижение напряжений несоответствия за счет образования различных дефектов часто сопровождается ухудшением функциональных свойств гетероструктур и их последующим разрушением. Поэтому тщательный анализ напряжений несоответствия в гетероструктурах с учетом их реальной формы огранки имеет большое значение для создания бездефектных полупроводниковых устройств с повышенными характеристиками. С этой целью мы нашли аналитическое решение краевой задачи в классической теории упругости для клиновидного тела, содержащего прямолинейную нить, подверженную трехмерному растяжению собственной деформации, которая является так называемой «дилатационной нитью».

Для определения поля напряжений этого дефекта введем функцию напряжений Эри в виде суммы $\psi = \psi^{el} + \psi^{pl}$, где ψ^{el} - аналитическое решение бигармонического уравнения в упругой задаче для клина, а ψ^{pl} - частное решение, которое соответствует дилатационной нити. Интегральное преобразование Меллина используется для вывода системы уравнений для функции напряжения Эри. В результате желаемые компоненты напряжения находятся в интегральной форме с помощью обратного преобразования Лапласа-Меллина [1]. Анализ полученного решения проводился численно с использованием графиков напряжений.

Примеры двух графиков напряжений показаны на рис. 1 для случая $r = 0.5r_0$ и различных значений угла раскрытия клина 2β . Графики показывают, в частности, выполнение граничных условий на свободных поверхностях тела.

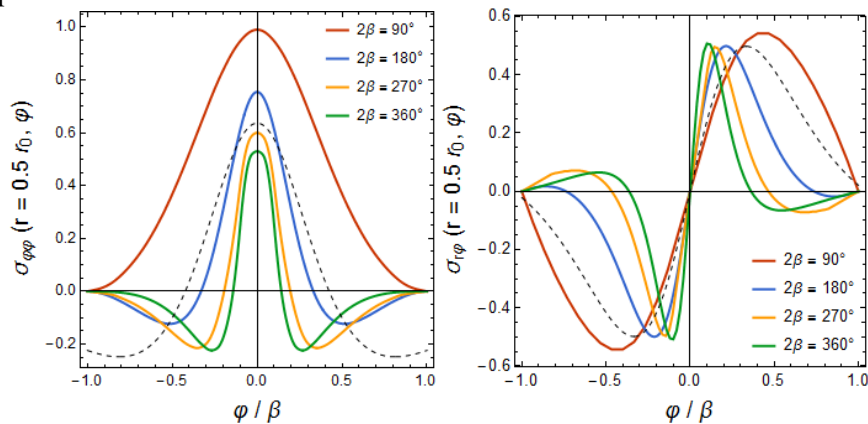


Рис. 1. Распределение компонент напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}$ и $\sigma_{r\varphi}$ в случае $r = 0.5r_0$. Пунктирные кривые соответствуют случаю бесконечной упругой среды без свободных поверхностей.

Найденное решение удовлетворяет уравнениям равновесия и граничным условиям на свободных поверхностях клиновидного тела. Свободные поверхности сильно влияют на распределение поля напряжений.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-29-12041.

1. Gudkina Z. V. et al. The misfit stresses of dilatation line in semiconductor nanoheterostructures with angular boundaries //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – T. 1695. – №. 1. – С. 012014.

РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА В ДЕНТИНЕ

Ж.В. Гудкина^{1,2}, М.Ю. Гуткин^{2,3,4}, Т.С. Аргунова¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²СПбПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург

e-mail: gudkinazhanna@mail.ru

Дентин – природный пористый материал с иерархической структурой, включающей в себя не менее семи масштабных уровней. Например, дентинные каналы представляют собой вытянутые микрополости диаметром 2-5 мкм, располагающиеся на расстоянии 10 мкм друг от друга.

В течение многих десятилетий прочность и ударная вязкость дентина были в центре внимания обширных исследований, однако их происхождение до сих пор не ясно. Частично это объясняется тем, что ни один метод визуализации не может отображать по крайней мере несколько структурных уровней дентина одновременно. Среди других важных тем, связанных с дентином человека, большой интерес вызывают процессы распространения в нем трещин. Исследования в этой области показали, что основным механизмом упрочнения является перекрытие трещин связками без трещин [1]. Так называемые «мостики» неповрежденного материала наблюдались непосредственно с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов и рентгеновской томографии [2]. Были представлены доказательства взаимодействия каналов с растущей микротрещиной. Однако не было предложено никакого механизма, объясняющего, как образуются вторичные (сателлитные) микротрещины и как микротрещина притягивается к каналу.

В данной работе представлены экспериментальные доказательства и теоретическая модель распространения трещин поперечного сдвига в дентине при одноосном сжатии. Экспериментальные наблюдения образцов дентина размером несколько миллиметров проводились методом рентгеновской томографии с использованием синхротронного излучения. 2D-срезы (томограммы) выявили доминирующие и сателлитные трещины поперечного сдвига в образцах дентина после нагрузки: оба типа трещин распространяются по дентинным каналам [3].

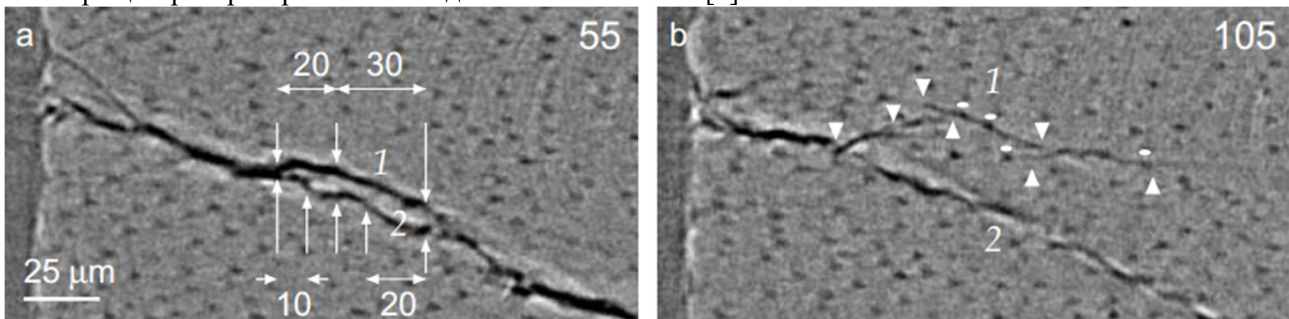


Рис. 1. Рентгеновские томограммы, полученные для образца дентина с трещинами. Поперечные сечения микроканалов выглядят как темные пятна. (а) Сечение магистральной трещины, которая разветвляется на две составляющие: 1 и 2. (б) Сечение той же трещины, удаленное на 50 мкм от первого.

Сделан вывод о том, что растягивающие напряжения на поверхности дентинных каналов, расположенных вблизи вершины заторможенной магистральной трещины, достаточны для образования сателлитных трещин. Процесс раскрытия трещины в дентине происходит за счет последовательных перемещений ее вершины от одного канала к другому (рис. 1) в плоскости действия максимальных локальных растягивающих напряжений; это сопровождается раскрытием сателлитных трещин в окрестности вершины заторможенной магистральной трещины.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-29-12041.

1. Kinney J. H. et al. Age-related transparent root dentin: mineral concentration, crystallite size, and mechanical properties // *Biomaterials*. – 2005. – Т. 26. – №. 16. – С. 3363-3376.

2. Nalla R. K., Kinney J. H., Ritchie R. O. Effect of orientation on the in vitro fracture toughness of dentin: the role of toughening mechanisms // *Biomaterials*. – 2003. – Т. 24. – №. 22. – С. 3955-3968.

3. Argunova T. S., Gudkina Z. V., Gutkin M. Y. A Model of Microcrack Development in Human Tooth Dentin Using Data of Microtomography // *Technical Physics Letters*. – 2020. – Т. 46. – №. 5. – С. 505-509.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ МЕЖДУ КОЛЕСОМ И ДОРОГОЙ

Г.В. Гусак

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: g_gusak@mail.ru

Изучается контактное взаимодействие деформируемого колеса и недеформируемой дороги в ситуациях, когда колесо находится под действием различных видов статических нагрузок, а также при некоторых режимах движения.

«Щеточные» модели представляют периферию колеса в виде набора деформируемых элементов, стержней или пружинок [1, 2]. В отличие от моделей, основанных на методе конечных элементов, они допускают менее громоздкое математическое описание, позволяя при этом учитывать характер распределения сил в зоне контакта (ЗК), моделировать проскальзывание и ряд других эффектов, благодаря чему применяются для аналитического описания законов поведения деформируемого колеса.

В работе предложен новый механический аналог деформируемой периферии колеса, «стержневой протектор» [3], который принадлежит к классу щеточных моделей, однако опирается на иной набор гипотез, нежели предшествующие модели данной группы [1, 2]. Колесо представлено твердым диском, окруженным по периметру набором радиально расположенных упругих стержней.

В зависимости от нагрузок, действующих на колесо, жесткостных и геометрических характеристик протектора, трения с дорогой определяются границы зоны контакта, наличие или отсутствие проскальзывания, картина распределения реакций, величина, направление и точка приложения равнодействующей реакции, потери энергии за счет трения. Проводится анализ динамики колеса с учетом проскальзывания в контактной области. Рассматриваются следующие типы движения: качение без проскальзывания, качение с частичным проскальзыванием, движение «юзом».

Получены выводы о зависимости силы трения от относительного проскальзывания в ЗК (рис.): сила трения минимальна при качении без проскальзывания; она возрастает с ростом участка проскальзывания в ЗК пока не достигнет предельного значения, равного по величине силе трения скольжения. Переход к предельному значению силы трения происходит, когда начинается скольжение всей ЗК. Предельное значение силы трения пропорционально вертикальной нагрузке (весу колеса). Найденная зависимость согласуется с теорией качения Картера, которая имеет экспериментальные подтверждения.

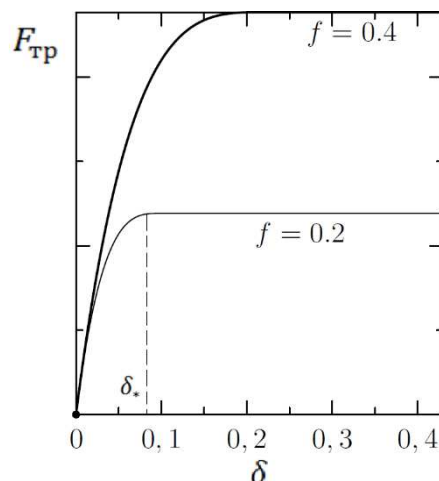


Рис. Зависимость силы трения от относительного проскальзывания в ЗК при различных коэффициентах трения (ЗК мала, увеличение соответствует увеличению размера области проскальзывания).

1. Расејка Н.В. Tyre and Vehicle Dynamics // L.: Elsevier, 2005. – 621p.
2. Новожилов И.В. Фракционный анализ // М.: Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.
3. Гусак Г.В. Изучение контактного взаимодействия колеса и дороги с использованием модели стержневого протектора // Дисс. к.ф.-м.н., МГУ, 2021: <https://istina.msu.ru/dissertations/361637263/>

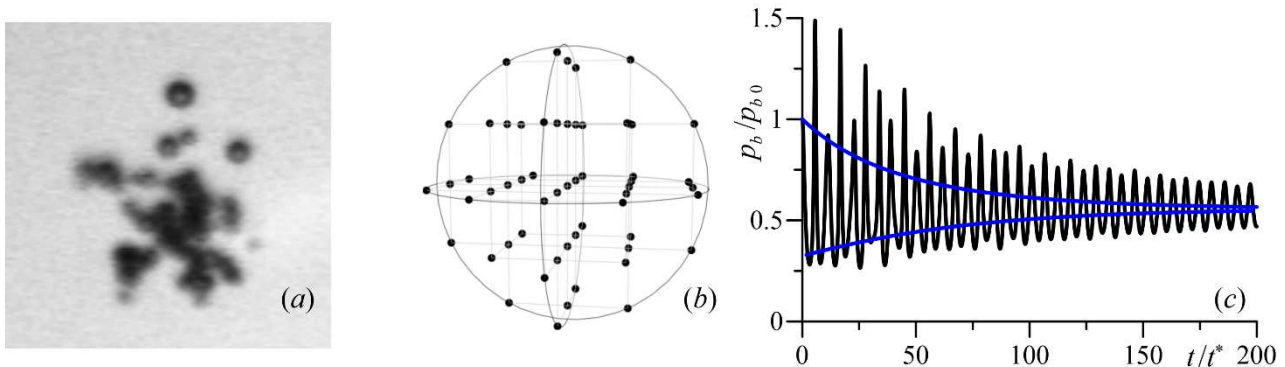
ДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В СФЕРИЧЕСКОМ КЛАСТЕРЕ ПРИ МГНОВЕННОМ ПОВЫШЕНИИ ИХ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

И.А. Аганин, А.И. Давлетшин

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань
e-mail: aganel@gmail.com, anas.davletshin@gmail.com

При достаточно больших концентрациях парогазовых пузырьков в жидкости значительную роль играет их гидродинамическое взаимодействие [1, 2]. В результате взаимодействия пузырьки могут сильнее расширяться и сжиматься, перемещаться по жидкости, образовывать кластеры (рис. *a*) и т.д. Эти и другие особенности взаимодействия пузырьков могут быть использованы в различных приложениях.

В настоящей работе изучается влияние взаимодействия между воздушными пузырьками в сферическом кластере (рис. *b*) в водоглицериновой смеси при мгновенном повышении их внутреннего давления. В экспериментах подобное повышение давления реализуется, например, при образовании пузырьков искровым или оптическим (лазерным) пробоем жидкости. До момента времени $t=0$ пузырьки и жидкость находятся в состоянии покоя, радиус пузырьков $R_0=0.25$ мм, давление жидкости $p_L=1$ бар, ее плотность $\rho_L=1156$ кг/м³. Центры пузырьков расположены в узлах равномерной кубической сетки внутри сферической области так, что один из пузырьков располагается в центре этой области. Размер ячеек сетки 5 мм. При $t=0$ давление в пузырьках p_b мгновенно повышается от равновесного значения p_{b0} до $p_{b0}+\Delta p$, где Δp варьируется в диапазоне от 0.1 до 0.8 бар. Динамика пузырьков в кластере описывается системой ОДУ, представляющей собой частный случай уравнений работы [1].



(*a*) – фотография кластера пузырьков из эксперимента [2]; (*b*) – схема изучаемого кластера из 57 пузырьков; (*c*) – изменение безразмерного давления в центральном пузырьке кластера (черная кривая) и огибающие экстремальных значений давления в одиночном пузырьке (синие кривые), $t^*=R_0(\rho_L/p_L)^{0.5}$.

Повышение давления в пузырьках приводит к возникновению их радиальных колебаний, которые постепенно затухают под влиянием сжимаемости и вязкости жидкости. В результате система со временем переходит в новое равновесное состояние. Процесс перехода в новое равновесное состояние пузырьков кластера во многом отличается от перехода одиночного пузырька, что обусловлено взаимодействием пузырьков. В частности, колебание давления в пузырьках кластера затухает существенно немонотонно (рис. *c*). При этом у пузырьков в кластере скорость затухания и частота колебаний давления значительно меньше, чем у одиночного пузырька. Максимальные давления в пузырьках центральной области кластера принимают значения, заметно превосходящие максимальное давление в одиночном пузырьке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-11-00100).

1. Aganin A.A., Davletshin A.I. Equations of interaction of weakly non-spherical gas bubbles in liquid // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. V. 39. № 8. P. 1047-1052.

2. Luther S. Theoretische Beschreibung und experimentelle Untersuchung raum-zeitlicher Strukturbildung in akustischen Kavitationsblasenfeldern. – Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek, 2000.

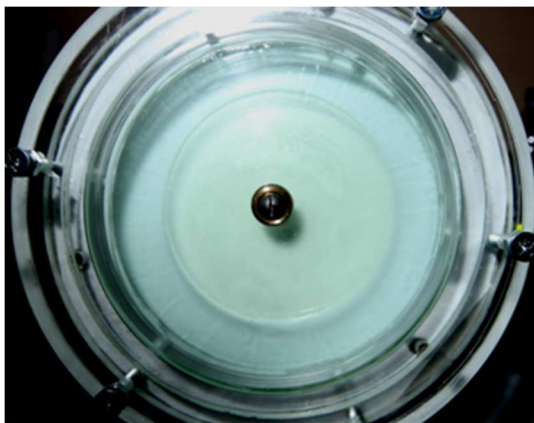
УСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЩЕЛЕВОМ ЗАЗОРЕ

Ю.С. Дементьева, В.С. Кобелева, В.Г. Козлов
Лаборатория вибрационной гидромеханики, ПГГПУ, Пермь
e-mail: yular2000dem@gmail.com

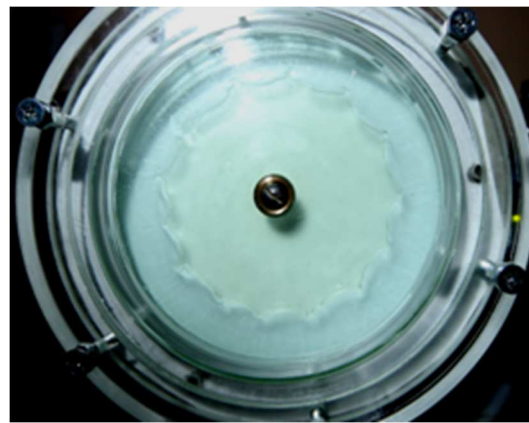
Экспериментально исследуется форма границы раздела двух жидкостей с высоким контрастом вязкостей в вертикальном щелевом зазоре с круговой границей, неравномерно вращающемся вокруг горизонтальной оси. Целью исследования является изучение динамики границы раздела в зависимости от размера и физических свойств фазового включения.

В [1] было обнаружено, что на осесимметричной границе раздела, которая формируется во вращающейся полости под действием центробежной силой, при повышении амплитуды модуляции скорости вращения пороговым образом возбуждается периодический пространственный рельеф. Показано, что обнаруженная неустойчивость связана с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца и возбуждается в результате осциллирующего движения маловязкой жидкости вблизи межфазной границы. Настоящие исследования являются продолжением вышеупомянутой работы. Варьируются размер фазового включения, свойства жидкостей (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения), частота либрации и частота вращения. Проводится сравнение экспериментальных результатов с построенной в [1] теоретической моделью явления. При неравномерном вращении вокруг горизонтальной оси скорость изменяется со временем по закону $\Omega = \Omega_{rot}(1 + \varepsilon \cos \Omega_L t)$. Здесь Ω_{rot} – скорость вращения полости, а Ω_L и ε – круговая частота и безразмерная амплитуда либраций. Рабочей полостью является короткий горизонтальный цилиндр длиной $d = 5.0$ мм и радиусом $R_c = 7$ см. Между торцами цилиндра образуется узкий вертикальный щелевой зазор (ячейка Хеле-Шоу для вязкой жидкости). Полость заполнена двумя жидкостями разной плотности и вязкости.

На рис. *а* показана межфазная граница под действием центробежной силы при равномерном вращении, которая имеет осесимметричную форму. В экспериментах использовались флуоринерт FC-40 и касторовое масло в объемном соотношении 60% к 40%. Вязкое масло, имеющее меньшую плотность, располагается вблизи оси вращения. На рис. *б* представлена фотография границы раздела в надкритической области, при больших значениях амплитуды модуляции скорости. Показано, что с дальнейшим повышением амплитуды модуляции скорости ε высота рельефа h монотонно возрастает, а азимутальное волновое число m (полное число холмов) понижается.



а



б

Фотографии границы раздела жидкостей при частоте вращения $f_{rot} = 2.5$ об/с и частоте модуляции $f_L = 6$ Гц; фрагменты *а*) и *б*) соответствуют $\varepsilon = 0.2$ и 0.3

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (проект Научных школ С26/119).

1. VG Kozlov, JS Dementieva, VS Kobeleva and MA Petuhova. Stability of interface between liquids with high viscosity contrast in unevenly rotating cavity // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1809. 012022 DOI/10.1088/1742-6596/1809/1/012022.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ С УЧЕТОМ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ ЗАКАЧИВАЕМОГО АКТИВНОГО СОСТАВА

М.Н. Кравченко^{1,2}, Н.Н. Диева², Е.Г. Разбегина², А.Д. Малова²
¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
²РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва
e-mail: ninadieva@bk.ru

Современные методы интенсификации и повышения добычи нефти из углеводородных пластов чаще всего основаны на действии тепловой энергии, поставляемой в горную породу извне. Прогрев насыщенной пористой среды приводит к увеличению нефтеотдачи за счет роста подвижности пластовых флюидов при снижении их вязкости и характера взаимодействия с пористой матрицей, а также за счет изменения пропускной способности пласта-коллектора при его расколматировании, повышении трещиноватости и росте связанности пор. Наиболее эффективным является сочетание тепловых методов с использованием специальных химических веществ [1].

Настоящая работа посвящена термогазохимическому воздействию (ТГХВ) на призабойную зону скважины, где за счет экзотермической реакции разложения бинарной смеси (аммиачной селитры и нитрита натрия) в пористой среде аккумулируется выброс горячего газа и других продуктов реакции [2].

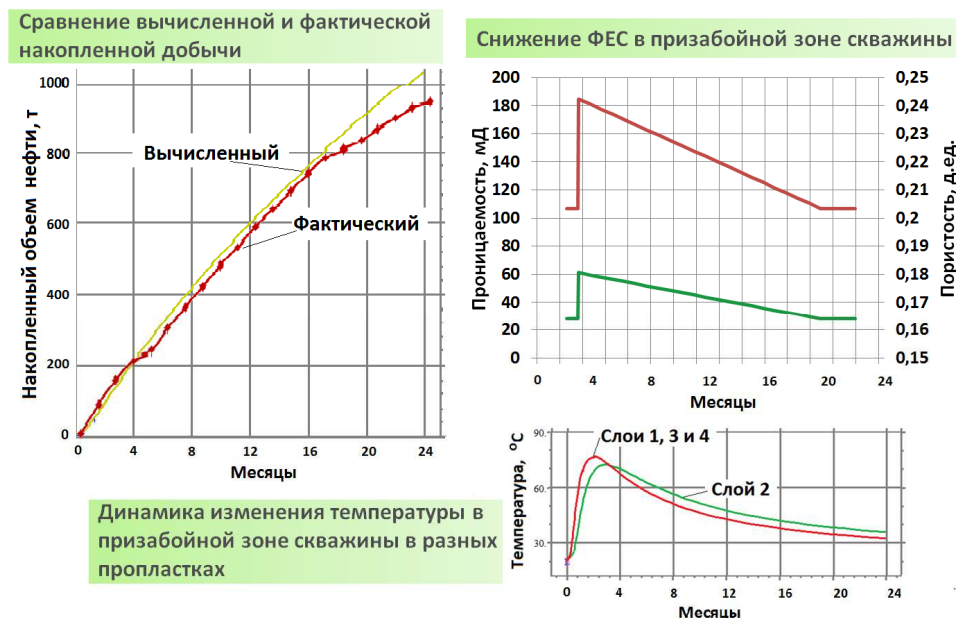


Рис. Результативность воздействия на породу бинарными смесями.

На основе результатов математического моделирования промышленных экспериментов [1,2] дано обоснование причин кратного продолжительного повышения дебита нефтяных скважин на низкопроницаемых пластах после проведения ТГХВ. Показано, что в отличие от классических тепловых методов воздействия на углеводородные пласты происходит не только снижение вязкости флюида, но и в ряде случаев включаются механизмы фазового преобразования различных углеводородных компонентов, в том числе изначально входящих в твердую часть породы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-07-00433 А.

1. Kravchenko M.N., Dieva N.N., Fatykhov G.A. Hydrodynamic Analysis of Pyrolytic Studies for the Kerogen-Containing Rocks of Romashkinskoye Field. // Processes in GeoMedia 2021. Volume III. pp 273-284. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_26

2. Lishchuk A. N., Kravchenko M. N., Shesternina N. V., Dieva N. N., Nafikov A. A., Khisametdinov M. R., Kataev A. V. (2020). The Results of Pilot and Industrial Application of Thermal-Gas-Chemical Well Treatment with Binary Mixtures and Development of Mathematical Models for Reservoir Processes in Source Oil Rock. // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2020, October 26. SPE-201812-RU. <https://doi.org/10.2118/201812-MS>

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕЙСМОИСТОЧНИКА НА ГРУНТ

Е.А. Ефимов

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

e-mail: efimov@icm.krasn.ru

Импульсные электромагнитные источники всё более широко применяются в сейсморазведке. Малогабаритность импульсных источников позволяет проводить разведку в таких труднодоступных местах, как тундра, тайга, районы с вечной мерзлотой. Благодаря своим конструктивным особенностям, установки такого типа способны эффективно преобразовывать потребляемую энергию в механическую.

В данной работе рассматривается плоскостная модель грунта с однородными изотропными слоями. Чтобы описать волновые движения в такой среде, будем рассматривать задачу динамики деформируемого твёрдого тела в двумерной осесимметричной постановке. Численный алгоритм основан на методе двуциклического покомпонентного расщепления. На этапах расщепления возникают одномерные задачи вдоль направлений осей, для решения которых применяется ENO-схема, основанная на методе распада разрыва С. К. Годунова.

Численные эксперименты проведены при использовании разработанного комплекса программ для многопроцессорных вычислительных систем. На рисунке изображены волновые поля в однородных средах после импульсного воздействия сейсмоисточником. Слева показаны линии уровня вертикальной компоненты скорости в однородной упругой среде, а справа в вязкоупругой среде, описываемой моделью Пойнтинга-Томсона.

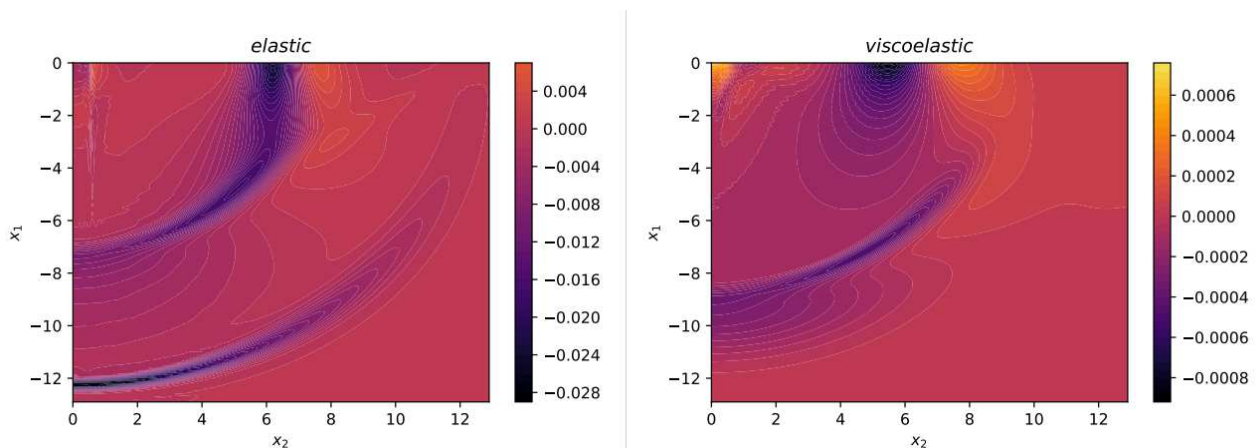


Рис. Линии уровня вертикальной компоненты скорости для упругой и вязкоупругой среды.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

1. Е. А. Efimov, V. M. Sadovskii, and O. V. Sadovskaya. Mathematical modeling of the impact of a pulse seismic source on geological media // AIP Conference Proceedings. 2020. № 2302. 120002. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0033576>.

2. Садовский В.М., Садовская О.В., Ефимов Е.А. Одномерные разностные схемы для реализации метода расщепления осесимметричных уравнений динамики упругой среды // Вычислительные методы и программирование. 2021. № 22. С.47–66. – DOI: 10.26089/NumMet.v22r104.

РАЗРАБОТКА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

В.А. Жигарев¹, А.Л. Неверов¹, А.В. Матвеев¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск

e-mail: VZhigarev@sfu-kras.ru

Сооружение геологоразведочных скважин в сложных горно-геологических условиях невозможно без применения современных буровых технологических жидкостей.

Использование комплексов ССК и КССК при бурении скважин, пересекающих зоны тектонических нарушений с глинками трения, в частности хлоритами с полиакриламидными (ПАА) растворами осложняется тем, что происходит гидратация минералов и вымывание цемента и как следствие обрушение стенок скважины. Растворы ПАА не обладают пространственной структурой и поэтому не удерживают шлам (особенно крупный), а укрупняют частицы горных пород (флокуляция) и осаждают последних [1].

В связи с озвученными проблемами была сформирована следующая цель: разработка буровых растворов для сооружения геологоразведочных скважин. Для выполнения данной цели необходимо решить следующие задачи: 1) разработка рецептур буровых растворов; 2) исследование реологических и физических характеристик буровых растворов; 3) расчёт значения перепада давления при прокачивании созданных буровых растворов.

Параметры приготовленных буровых растворов оценивались по методике, изложенной в международном стандарте ISO 10414-1. Реологические параметры измеряли на ротационном вискозиметре OFITE 900 (рис. 1). Буровые растворы готовили на дистиллированной воде с добавлением химических реагентов: биополимеры ксантанового типа (гаммаксан и флоксан), низковязкая и высоковязкая полианионная целлюлоза (Оснопак). Кроме этого в работе использовали модифицированный крахмал и жидкое стекло.



Рис. 1. Фото вискозиметра (слева), и фото образца горной породы помещенного в буровой раствор (справа)

В ходе исследования были получены следующие результаты: для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях, рекомендуется применять буровые растворы на основе биополимеров. В качестве основных компонентов для приготовления растворов рекомендуется использовать следующие реагенты: Гаммаксан, крахмал и жидкое стекло.

Численные исследования потерь давления при бурении комплексами КССК и ССК показали, что для применения разработанных рецептур буровых растворов, обеспечивающих устойчивость стенок скважин, необходим нестандартный алмазный породоразрушающий инструмент, использование такого инструмента позволит снизить гидродинамические потери давления при прокачивании вязких полимерных растворов с расчетными реологическими параметрами, что в итоге сможет повысить эффективность сооружения глубоких геологоразведочных скважин комплексами КССК.

1. Неверов А.Л., Минаков А.В., Жигарев В.А., Каратаев Д.Д. Повышение эффективности сооружения глубоких скважин комплексами со съёмными керноприемниками // ФТПРПИ. 2016. № 6. С. 75-85.

РАЗРАБОТКА АГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА, ФОРМИРУЮЩЕГО СТРУЮ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Ю.С. Зайко¹, А.А. Спасова²

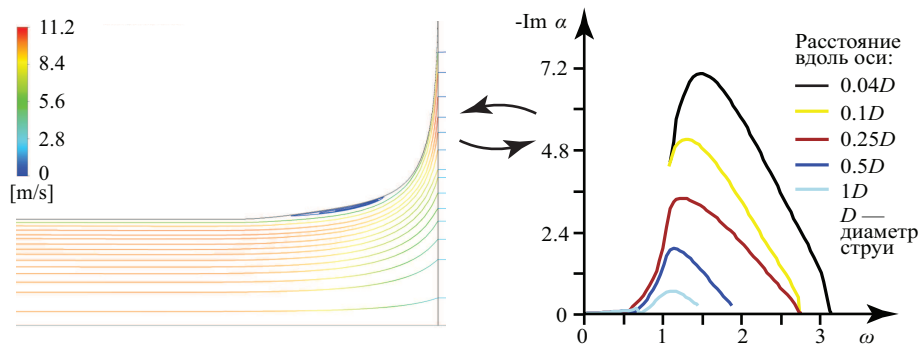
¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: zayko@imec.msu.ru

Ранее в невязком приближении была подробно изучена линейная неустойчивость струи, формируемой устройством, состоящим из дегурбулизатора и быстро расширяющегося диффузора с металлическими сетками на выходе [1]. В частности, обнаружено, что затопленная струя может быть абсолютно неустойчивой без наличия противотечения [2], которое необходимо для абсолютной неустойчивости другого семейства профилей скорости [3, 4]. Расчёты показывают, что на характер неустойчивости влияют два фактора: 1) величина скорости потока в обобщённой точке перегиба, генерирующей наиболее быстро растущую моду возмущений, 2) величина производной скорости по радиальной координате в этой точке. Меняя указанные характеристики профиля скорости, можно влиять на характер неустойчивости, а также подбирать «менее неустойчивые» профили скорости. Такое управление струями имеет прикладной интерес: например, для создания локальных чистых зон требуются длинные ламинарные струи, а для ускорения перемешивания – струи, турбулизующиеся как можно ближе к выходу из сопла.

В этой работе строится алгоритм оптимизации геометрии канала диффузора, заданной параметрически. Для этого создаётся модель осесимметричного течения для заданной геометрии канала в комплексе CFD, разрабатывается программа-оптимизатор по методу градиентного спуска. В качестве минимизируемого функционала могут выступать характеристики неустойчивости профиля скорости, получаемого в рамках CFD на выходе из формирующего устройства. Например, минимизируемым функционалом может быть функция, связанная с максимальной скоростью роста или групповой скоростью сноса растущих возмущений, или их комбинация. Характеристики неустойчивости течения с данным профилем скорости рассчитываются в рамках невязкого или вязкого приближений – решаются задачи на собственные значения для уравнения Рэлея или Орра-Зоммерфельда, соответственно.

Представлены результаты расчётов для ряда профилей канала диффузора и получаемых в нём профилей скорости, в том числе изучается характер неустойчивости – конвективный или абсолютный.



Линии тока внутри диффузора, формирующего затопленную струю с длинным ламинарным участком, и зависимость скоростей роста от частоты в полученной струе для профилей на разных расстояниях от выхода из диффузора.

Работа поддержана грантом РФФИ (№20-19-00404).

1. Зайко Ю.С., Гареев Л.Р., Чичерина А.Д., Трифионов В.В., Веденеев В.В., Решмин А.И. Экспериментальное обоснование применимости линейной теории устойчивости к затопленной струе // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2021. Т. 497. С. 44 – 48.

2. V. Vedeneev, J. Zayko. On absolute instability of free jets // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1129. 012037.

3. Huerre P., Monkewitz P.A. Absolute and convective instabilities in free shear layers // J. Fluid Mech. 1985. V.159. P. 151 – 168.

4. Abid M, Brachet M, Huerre P. Linear hydrodynamic instability of circular jets with thin shear layers // Eur. J. Mech. B/Fluids. 1993. V.12(5). P. 683 – 693.

РАСЧЕТ ПРОФИЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПММА, ИНИЦИИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКОВ

О.К. Зайченко^{1,2}, В.М. Кац¹, В.А. Морозов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²КБ «Кибершельф», Санкт-Петербург

e-mail: v.kats@spbu.ru

Представлены результаты лабораторного исследования нагружения цилиндрического образца из полиметилметакрилата (ПММА) с использованием электрического взрыва проводников. Разработана математическая модель построения профилей радиального напряжения в образцах и их эволюции в процессе распространения ударноволнового импульса в среде.

Проведено сравнение расчетных профилей радиального напряжения с экспериментально измеренными профилями. Дан анализ затухания ударноволнового процесса при различных длительностях импульса нагружения.

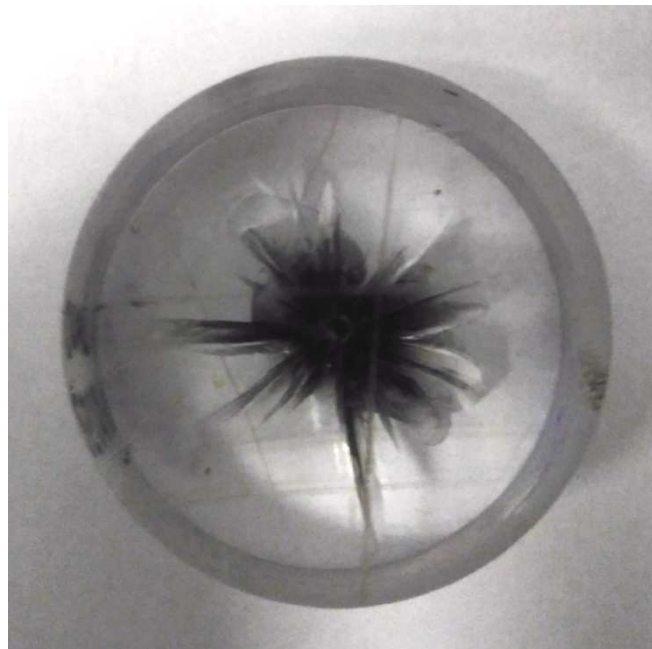


Рис. Характерная картина разрушения образца из ПММА при электрическом взрыве проводника.

1. Morozov, V. A., Atroshenko, S. A., Kats, V. M. Comparative analysis of characteristics of material damage at various load speeds by electric explosion of conductors // *Procedia Structural Integrity*, 2017. Vol. 6. P. 154-160.

2. Морозов В.А., Богатко В.И., Атрошенко С.А., Кац В.М., Газизуллина А.Р.. Нагружение, деформирование и разрушение цилиндрических образцов из полиметилметакрилата и фторопласта с использованием электрического взрыва проводников // *Журнал технической физики*. 2020 . Т 90. № 2. С. 233-237.

3. Морозов В.А., Богатко В.И., Яковлев А.Б. О математическом моделировании процессов высокоскоростного нагружения материалов на кафедре физической механики СПбГУ // *Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия*. 2020 Т. 7(65). № 4. С. 699-713.

4. Zaychenko O.K., Morozov V.A. Building a model for calculating stress under dynamic loading of metal rings by the magnetic pulse method // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2020. Vol. 1479. 012130.

РЕШЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ

Н.А. Зверев¹, А.В. Земсков^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: nikolayzverev1995@gmail.com

В настоящей работе рассмотрена полярно-симметричная задача механо-dиффузии, состоящая в аналитическом определении параметров НДС (напряженно-деформированного состояния) сплошного одномерного многокомпонентного однородного ортотропного цилиндра, находящегося под действием нестационарных радиальных объемных возмущений. Поверхность цилиндра предполагается свободной от нагрузок и на ней поддерживается постоянный уровень концентрации диффузанта. В задаче учитывается время релаксации диффузионных потоков, подразумевающее конечную скорость распространения диффузионных возмущений. Математическая постановка задачи включает в себя дифференциальное уравнение движения, закон сохранения массы в локальной форме, а также N уравнений массопереноса, вызванного диффузией [1–4].

Решение задачи ищется с помощью метода эквивалентных граничных условий [5]. Для этого рассматривается вспомогательная задача, решение которой получается с помощью интегрального преобразования Лапласа по времени и разложения искомых функций в ряды Фурье по специальным цилиндрическим функциям Бесселя нулевого и первого порядков. Далее строятся соотношения, связывающие правые части граничных условий исходной и вспомогательной задач. Эти соотношения представляют собой систему интегральных уравнений Вольтерра I-го рода. Решение такой системы осуществляется численно с помощью квадратурных формул средних прямоугольников.

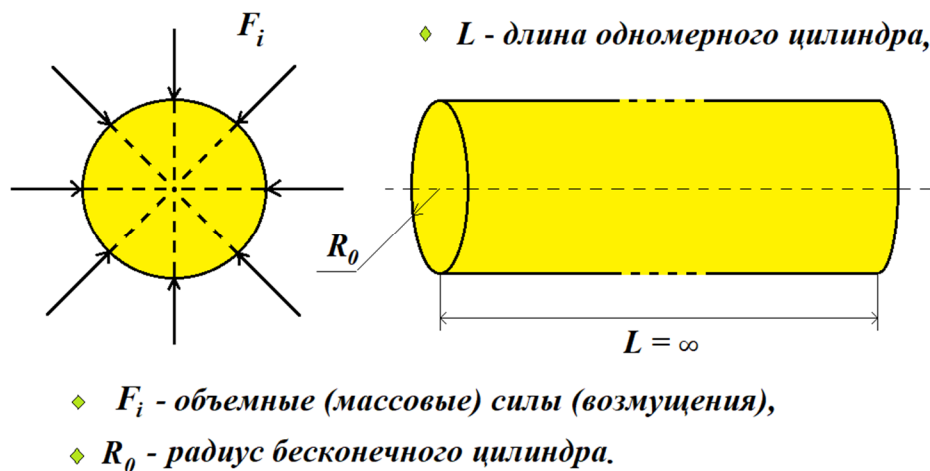


Рис.1. Иллюстрация к постановке задачи.

1. Deswal S., Kalkal K. K., Sheoran S. S. Axi-symmetric generalized thermoelastic diffusion problem with two-temperature and initial stress under fractional order heat conduction // Physica B: Condensed Matter. – 2016. – Vol. 496. – P. 57–68.

2. Aouadi M. A problem for an infinite elastic body with a spherical cavity in the theory of generalized thermoelastic diffusion // International Journal of Solids and Structures. – 2007. – Vol. 44. – P. 5711–5722.

3. Зверев Н. А., Земсков А. В. Модель механо-dиффузии для сплошного ортотропного цилиндра с учетом релаксации диффузионных процессов // 19-я Международная конференция Авиация и космонавтика. 23–27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – Перо Москва, 2020. – С. 458–459.

4. Зверев Н. А., Земсков А. В., Тарлаковский Д. В. Моделирование нестационарных связанных механо-dиффузионных процессов в изотропном сплошном цилиндре // Проблемы прочности и пластичности. – 2020. – Т. 82, №2. – С. 156–167.

5. Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V. Method of the equivalent boundary conditions in the unsteady problem for elastic diffusion layer // Materials Physics and Mechanics, 2015, No 1, Vol 23, pp. 36–41.

МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ПРИСУТСТВИИ УПРУГОГО ФЛЮИДА В ПЛАСТАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Е.В. Зинькевич¹

¹РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва

e-mail: liza.zinkevich.1999@mail.ru

Баженовская свита – уникальный геологический комплекс, который расположен практически на всей территории Западной Сибири. Уникальность этого комплекса заключается в том, что большая доля его низкопроницаемых (в 1000 раз меньше, чем у традиционных залежей) коллекторов, содержит углеводороды в двух формах: в форме легкой нефти и в форме органического вещества – керогена. Разработка залежей баженовской свиты – одна из перспективных и важных задач нефтегазовой отрасли России. Среди всех известных методов наиболее эффективными для баженовской свиты являются тепловые методы воздействия. Это связано с необходимостью высокой температуры для выхода легких углеводородов из керогеновой матрицы. На сегодняшний день одним из перспективных методов считается термогазовый метод, предусматривающий закачку в пласт воздуха для запуска окислительных реакций.

В рамках настоящей работы рассмотрена перекликающаяся задача закачки в пласты баженовской свиты горячего воздуха. Идея данного способа заключается в том, что в пласт нагнетают горячий газ, который, прогревая пласт, уменьшает вязкость легкой нефти и увеличивает выход углеводородов из керогена. Построенная модель данного теплого метода основана на законах сохранения массы и энергии. В модели учитывается не только сжимаемость закачиваемого газа, но и насыщающего пласт флюида, также учтено наличие в породе керогеносодержащих включений, которые при нагреве дают дополнительный приток подвижной фазы. Так же расчеты производятся для анализа притока при разных значениях температуры нагнетаемого агента и его насыщенности для разных условий организации закачки.

Моделирование проводилось на основе численного решения составленной математической модели. В ходе работы были получены поля распределения температуры, газонасыщенности и скорости фильтрации, а также графики изменения воронки регрессии во времени и зависимости относительных фазовых проницаемостей для пластового флюида и нагнетаемого газа от газонасыщенности. На рисунке приведено поле распределения газонасыщенности в пласте.

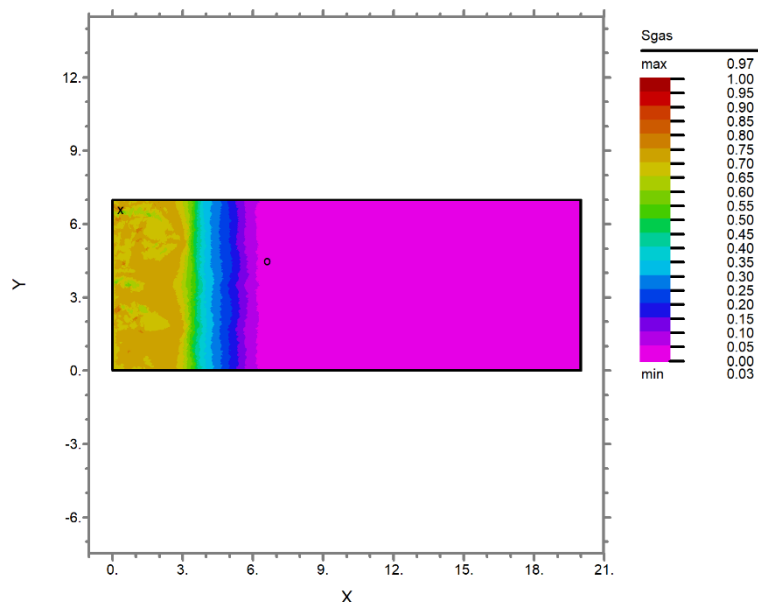


Рис. Поле распределения газонасыщенности в пласте (справа нагнетающая скважина, слева добывающая)

1. Зинькевич Е.В., Диева Н.Н. Сравнительный анализ эффективности применения термогазового метода и многостадийного гидроразрыва на пластах баженовской свиты // Материалы конференции, Тюмень, 2021, Том 2021, стр.1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150047>

О ВОЗМОЖНЫХ ПОПРАВКАХ К УРАВНЕНИЮ НАВЬЕ-СТОКСА ПО ЧИСЛУ КНУДСЕНА

Зо Аунг¹, С.О. Гладков¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва
e-mail: sglad51@mail.ru, shwehtikeaung1993@gmail.com

В настоящем сообщении речь пойдет о вычислении поправок к уравнению Навье – Стокса в виде дополнительных слагаемых по длине свободного пробега молекул.

Формально это означает, что малым параметром задачи является число Кнудсена, стандартно определяемого как $Kn = \frac{l}{L}$, где l – длина свободного пробега молекул жидкости или газа, L – линейный размер тела.

Важность нахождения этих поправок обусловлена интересом научной общественности к исследованию различных свойств наночастиц, в том числе и гидродинамических. Он связан с тем, что в последнее время довольно модными объектами исследования стали частицы, размер которых колеблется в диапазоне $10^{-4} - 10^{-6}$ см. Если речь идет о подобном рода линейных размерах, то классическими формулами, например, формулой Стокса для шара, воспользоваться довольно проблематично, поскольку в этом случае длина свободного пробега молекул оказывается сравнимой с линейным размером тела.

Все вычисления будут проведены с помощью хорошо проверенного, как теорией, так и практикой, метода классического кинетического уравнения Больцмана (см., к примеру, [1] – [3]). Благодаря этому подходу мы дадим подробный вывод уравнения Навье – Стокса с учетом всех дополнительных слагаемых с точностью до членов порядка τ_p^3 по времени релаксации τ_p , где \mathbf{p} – импульс молекулы. Проведенные вычисления позволяют получить ответ на поставленный вопрос, и выявить все дополнительные дивергентные слагаемые к правой части уравнения Навье Стокса. Одним из них будет бигармонический оператор, входящий в уравнение со знаком минус. Как это будет строго аналитически показано, наличие этого слагаемого дает возможность вычислить соответствующие поправки по числу Кнудсена $K = \frac{l}{2R}$ к силе Стокса (см. также [4] – [6]).

$$F_c = 6\pi\eta R f(K),$$

$$f(K) = \frac{\left[1 + 4Ke^{-\frac{1}{K}}(K^2 + K + 1)\right]}{(1 - 6K^2)} \left[\frac{(1 + 0.5K^2)}{(1 - 6K^2)} \left[1 + 4Ke^{-\frac{1}{K}}(K^2 + K + 1)\right] + \frac{e^{-\frac{1}{K}}}{9} \left(4 - \frac{15}{2}K - K^2 - K^3\right) \right].$$

1. S.O. Gladkov. The theory of thermal conductivity and hydrodynamics of Maxwell gas, which is under the influence of an external sound wave. Solid State Communications. 1995. V. 94. N9. PP.789 – 791.
2. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Физическая кинетика. Т. 10. М.: Наука. 1979. 528 с.
3. П. Резибуа, М. Де Лернер. Классическая кинетическая теория жидкостей и газов. М.: Мир. 1980. 423 с.
4. С.О. Гладков. О доказательстве единственности гидродинамического решения Стокса. Известия вузов. Физика. 2018. Т. 61. В. 6. СС. 103 – 105.
5. С.О. Гладков. О конвективном движении газа в цилиндрическом объеме. Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 12. СС. 71 – 75.
6. С.О. Гладков. К вопросу о вычислении времени остановки вращающегося в вязком континууме цилиндрического тела и времени увлечения соосного с ним внешнего цилиндра. ЖТФ. 2018. Т. 59. В. 3. СС. 377 – 341.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТОРМОЖЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО УПРУГОГО ЦИЛИНДРА НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

А.Н. Зотова, А.А. Зобова

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: kirzotova@gmail.com, alexandra.zobova@math.msu.ru

Рассматривается динамическая задача о торможении при качении с проскальзыванием бесконечного неоднородного цилиндра из упругого материала по основанию из того же материала. Ось цилиндра и граница недеформированного основания горизонтальны. Центр масс цилиндра смещен относительно оси цилиндра на малую по сравнению с радиусом цилиндра величину. Взаимодействие цилиндра и основания описывается моделью Картера, являющейся решением квазистатической задачи теории упругости [1, 2]. Суммарная касательная реакция зависит от относительного проскальзывания, при малом значении которого возникает сцепление материалов в области контактного взаимодействия, в результате чего суммарная сила трения уменьшается.

Ранее была изучена аналогичная задача для однородного цилиндра [3]. Анализ торможения неоднородного цилиндра был проведен на основании невозмущенного случая с помощью метода малого параметра и теории осреднения.

Аналитически показано, что при достаточно больших значениях угловой скорости цилиндра происходит быстрое убывание проскальзывания к значениям порядка малого параметра аналогично невозмущенной системе. Дальнейшее движение системы – квазипериодический дрейф вдоль кривой стационарных движений невозмущенной системы.

Изменение среднего периодического движения происходит вследствие диссипации энергии и проявляется при исследовании задачи во втором приближении по малому параметру. Получено автономное дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее систематическое изменение периодического движения. Было проведено численное моделирование системы и визуализация полученных результатов. Аналитические выводы полностью подтверждены численным интегрированием полной системы уравнений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-01-00140.

1. Carter F.W. On the action of a locomotive driving wheel // Proc. R. Soc. A. 1926. V. 112. P. 151–157.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
3. Горячева И.Г., Зобова А.А. Динамика упругого цилиндра на упругом основании // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83 Вып.1. С. 39–46.

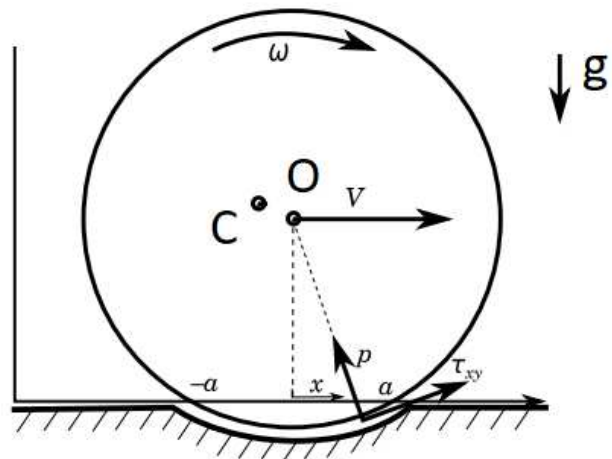


Рис. Неоднородный цилиндр на деформируемом основании.

ОБ УСИЛЕНИИ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ВБЛИЗИ ПЛАСТИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

О.О. Иванов¹, В.В. Веденеев¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: ivanov@imec.msu.ru

Плохо обтекаемые тела в потоке жидкости или газа могут совершать резонансные колебания, возникающие при сближении собственной частоты тела и частоты периодического срыва вихрей. В данной работе обсуждается эффект усиления колебаний цилиндра при нахождении его вблизи от края пластины конечной длины.

В данном исследовании рассматривается обтекание упругого цилиндра – резинового круглого шнура диаметром $D = 6$ мм, установленного в рабочей части аэродинамической трубы при характерных скоростях 0.4–0.65 м/с. Первичные эксперименты с изолированным цилиндром показали хорошее соответствие ранее известным работам, максимальная относительная амплитуда колебаний составила 0.29. Дымовые визуализации не показали каких-либо качественных отличий в вихревых дорожках за подвижным и неподвижным цилиндрами (Рис. 1а).

Основная серия экспериментов проводилась с установленной жесткой пластиной по близости от цилиндра. Пластина имела длину 35 мм ($\sim 6D$) и толщину 2 мм, ее концам была придана форма, близкая к эллипсу с полуосями 3 и 1 мм. Зоны усиления амплитуды колебаний A находились из сравнения этой величины с амплитудой колебаний A_0 одиночного цилиндра.

В ходе экспериментов было обнаружено большие зоны с различным поведением цилиндра. При расположении цилиндра «над» пластиной (Рис. 1б, $\text{Spacing} < 0$) амплитуда колебаний уменьшается по сравнению с амплитудой колебаний одиночного цилиндра, что согласуется с другими работами, исследовавшими поведение цилиндров вблизи плоскости [2]. В непосредственной близости от задней кромки цилиндра и далее по потоку ($\text{Spacing} > 0$) были обнаружены зоны усиления колебаний амплитуды вплоть до 40% по сравнению с одиночным цилиндром. Показано, что близость пластины модифицирует закон схода вихрей как за неподвижным, так и за колеблющимся цилиндром. Обсуждается возможные причины механизма усиления колебаний.

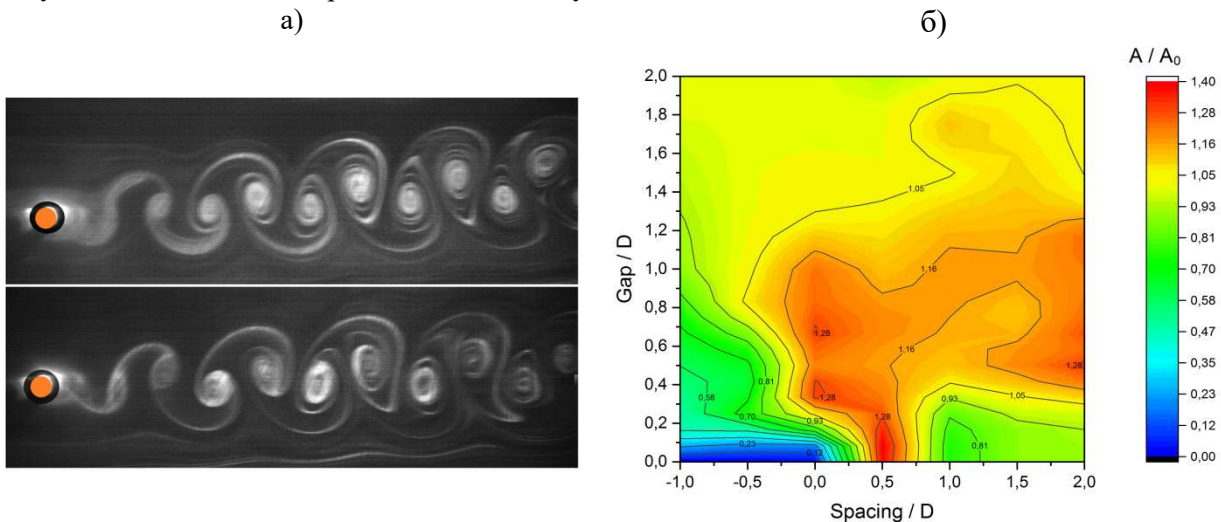


Рис. 1. а) Визуализация обтекания колеблющегося (сверху) и неподвижного (снизу) цилиндров.
б) Усиление амплитуды колебаний по сравнению с амплитудой одиночного цилиндра. Gap – зазор между поверхностями цилиндра и пластины, Spacing – смещение центра цилиндра по потоку относительно задней кромки пластины.

1. Williamson C. H. K., Govardhan R. Vortex-induced vibrations // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2004. Т. 36. С. 413-455.

2. Yang, B., Gao, F., Jeng, D. S., Wu, Y. Experimental study of vortex-induced vibrations of a cylinder near a rigid plane boundary in steady flow. // *Acta Mechanica Sinica.* 2009. 25(1), pp. 51–63.

ДИСКРЕТНЫЕ СТРУКТУРЫ ИМПАКТА КАПЛИ

А.Ю. Ильиных¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
e-mail: ilynykh@ipmnet.ru

Столкновение капель с поверхностью принимающей жидкости имеет место во многих технологических, технических и природных процессах. Процесс столкновения капли с жидкостью (импакт) сопровождается набором структурных компонентов как крупных (корона, всплеск, каскады вихревых колец), так и мелкомасштабных (пелена мелких струек и брызг, капиллярные волны, лигаменты). Набор компонентов, их геометрические и физические параметры зависят от режима импакта, который задается параметрами задачи (энергетикой капли, физическими и термодинамическими параметрами сред).

В систему уравнений задачи, помимо начальных и граничных условий, входят уравнения переноса массы, импульса и энергии, а также потенциал Гиббса, включающий дополнительные члены для поверхностного и приповерхностного слоев. Механизмы переноса – предмет актуальных теоретических и экспериментальных исследований. Перенос вещества капли в принимающую жидкость осуществляется посредством вихрей, волн и лигаментов – нитей, связывающих волны и вихри. Эволюция картины переноса вещества капли в принимающую жидкость исследована в данной работе методами фото- и высокоскоростной видеорегистрации с учетом собственных масштабов задачи в широком диапазоне параметров.

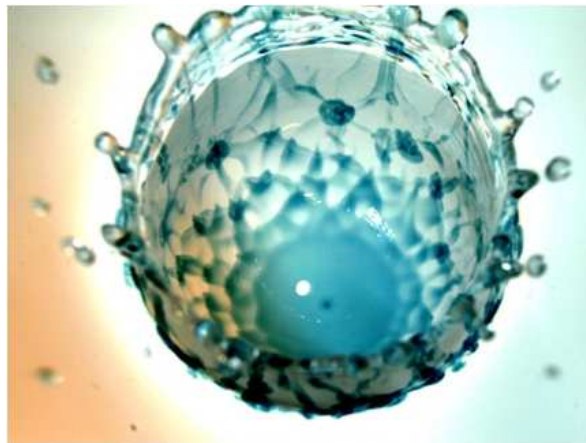


Рис. Дискретные структуры импакта: вихри на дне каверны и сетчатая структура на ее поверхности.

Высвобождение доступной потенциальной приповерхностной энергии в области контакта жидкости приводит к формированию новых компонентов течений. Отношение кинетической и потенциальной энергии определяет режим течения: интрузионный для $E_k < E_\sigma$ и режим всплеска при $E_k > E_\sigma$ [1], где в случае смешивающихся жидкостей экспериментально отмечен дискретный характер распределения вещества капли по поверхности каверны – лигаменты формируют полосы и сетку. Число ярусов сетки и концентрация вещества капли в структуре зависят от кинетической энергии капли [2]. В узлах сетки капельная жидкость формирует вихорьки, проникающие в толщу принимающей жидкости в форме вихревых петель. Циклический эффект наблюдается также в выбросе эшелонов брызг и капелек с вершин шипов венца [3].

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 19-19-00598). Эксперименты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН».

1. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // ДАН. 2021. Т. 496. № 1. С. 45–50.

2. Ильиных А. Ю. Тонкоструктурные компоненты всплеска капли // ПММ. 2019. Т. 83. № 3. С. 413–427.

3. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // ДАН. 2020. Т. 494. С. 42–46.

БРЫЗГИ ИМПАКТА КАПЛИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ПЛОТНОСТЯХ ЖИДКОСТЕЙ

А.Ю. Ильиных¹

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
e-mail: ilynykh@ipmnet.ru

Состав и траектория разлета брызг при столкновении капли с жидкостью представляют научный и практический интерес (системы охлаждения и пожаротушения, распространение инфекций, фармакология) и определяются условиями задачи – кинематическими и термодинамическими параметрами, физическими характеристиками взаимодействующих сред. В процессе формирования брызг важную роль играют процессы конверсии и передачи энергии (кинетической, поверхностной, внутренней) капли в принимающую среду, определяющие дискретный характер течения [1].

Особый интерес в гидродинамике импакта представляет влияние разницы плотностей и температур взаимодействующих сред. В экспериментах [2] методами фото- и видеорегистрации прослежена эволюция течений, образованных при погружении капель воды в перегретое подсолнечное масло и жидкий расплав металла (сплав Розе: 25% олово, 25% свинец, 50% висмут, нагретый до жидкого состояния при $T = 200 \div 280^\circ\text{C}$).

В данной работе основное внимание уделяется классификации, составу и энергетике тонких струек (стримеров) и систем мелких брызг, образованных в процессе столкновения капли воды со слоем расплавленного металла. При сохранении основных структурных компонентов течений эволюция брызг заметно отличается от наблюдаемой в традиционной постановке задачи.

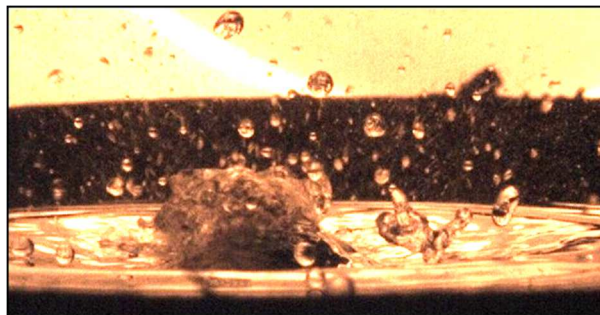


Рис. Эволюция брызг при падении капли воды на поверхность расплава металла.

Проведенная классификация последовательно вылетающих систем брызг включает семь этапов, для каждого из которых проведен анализ числа, размеров, состава, траекторий и энергий брызг и стримеров. При уничтожении приповерхностных слоев и выделении доступной потенциальной поверхностной энергии мелкие брызги радиально вылетают из области контакта. На втором и третьем этапе капли с вершин шипов и стримеров вылетают в широком диапазоне углов. Крупные водные капли с вкраплениями газовых пузырьков выбрасываются с вершины всплеска при распаде центральной струйки, вскипание капельного вещества формирует облака капель лопающихся пузырей (мелкие, летят в разные стороны). Более крупные капли захватывают обе среды, состоят из металлического ядра с водной оболочкой. На последней стадии на поверхности металла образуются металлические стримеры, с вершин которых выбрасываются металлические капли.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-19-00598). Эксперименты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН».

1. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // ДАН. 2020. Т. 494. С. 42–46.

2. Yakush S. E., Chashechkin Y. D., Ilinykh A. Y., Usanov V. A. The splashing of melt upon the impact of water droplets and jets // Applied Sciences. 2021. V. 11. No 3. P. 909.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ТРЕХМЕРНОЕ ФРИКЦИОННОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ

А.А. Каменских, А.П. Панькова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru, anastasia_pankova@mail.ru

В настоящей работе рассматривается актуальная задача механики деформированного твердого тела, связанная с мостостроением: влияния физико-механических и фрикционных свойств и толщины сферического полимерного слоя скольжения опорной части на деформирование конструкции. Задача рассматривается в трех мерной постановке, при действии на конструкцию только вертикальной нагрузки 1000 кН и направлена не только на оценку напряженно-деформированного состояния конструкции, но и необходима для подбора оптимального конечно-элементного разбиения и параметров моделирования поведения опорной части с целью дальнейшего перехода на исследование влияния горизонтальной нагрузки на работу конструкции.

Моделирование выполнено для трех вариантов материалов относительно тонкого слоя скольжения [1] и рассматривает три варианта фрикционного контакта: с учетом табличного и экспериментально полученных (с учетом и без учета смазки) коэффициентов трения. Математическая постановка, подробно описанная в [2] дополняется учетом больших деформаций в материале антифрикционной прослойки. На рис. представлена модель сферической опорной части, а так же деформирование относительно свободной поверхности торца слоя скольжения, как иллюстрация влияния фрикционных свойств материалов на деформирование конструкции при стандартной толщине прослойки 4 мм. Всего рассмотрено три варианта толщины прослойки 4, 6 и 8 мм.

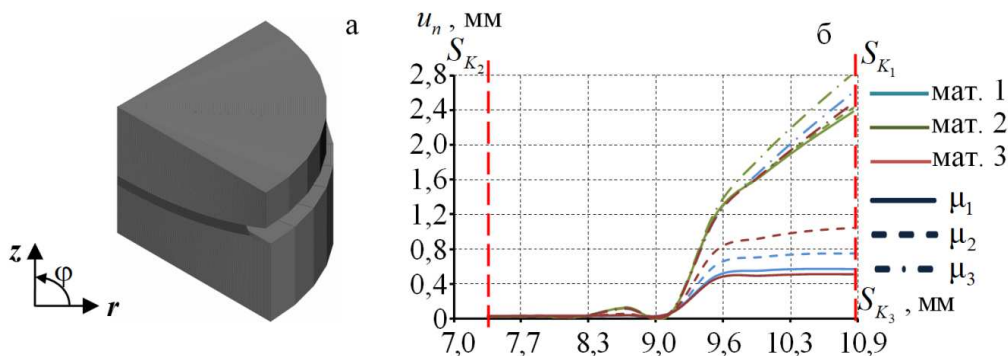


Рис. Трехмерная расчетная модель (а) и перемещения по нормали торца прослойки при толщине 4 мм (б).

В рамках 3D-анализа влияния толщины слоя скольжения на фрикционный контакт со стальными элементами конструкции при стандартной толщине слоя скольжения 4 мм установлено:

– Фрикционные свойства антифрикционных материалов оказывают значительное влияние на контактное касательное напряжение: уменьшение коэффициента трения значительно снижает максимальный уровень контактных касательных напряжений, что стремятся добиться производители опорных частей мостов. Но при этом возникает зона расхождения контактных поверхностей вблизи торца слоя скольжения.

– Процент расхождения поверхностей сопряжения минимален у конструкции опорной части с прослойкой из СВМПЭ (мат. 1) и модифицированного фторопласта (мат. 3).

– Минимальные перемещения торца прослойки наблюдаются в случаях отсутствия расхождения контактных поверхностей вблизи края слоя скольжения.

1. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials // PNRPU Mechanics Bulletin. 2020. № 4. P. 15-26.

2. Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 4. С. 46–59.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ

А.А. Каменских, В.И. Струкова

ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Современные полимерные и композиционные материалы набирают популярность во всех отраслях жизнедеятельности человека от медицины [1] до машиностроения [2]. Одной из отраслей промышленности, в которой нашли широкое применение современные полимеры и композиты, является мостостроение. Где материалы используются в качестве тонких слоев скольжения. В данной работе рассмотрено влияние физико-механических и фрикционных свойств полимерных материалов и геометрической конфигурации слоя скольжения на деформированное состояние конструкций опорных частей с разным положением и углом наклона торца антифрикционной прослойки относительно стальных плит опорной части (рис.).

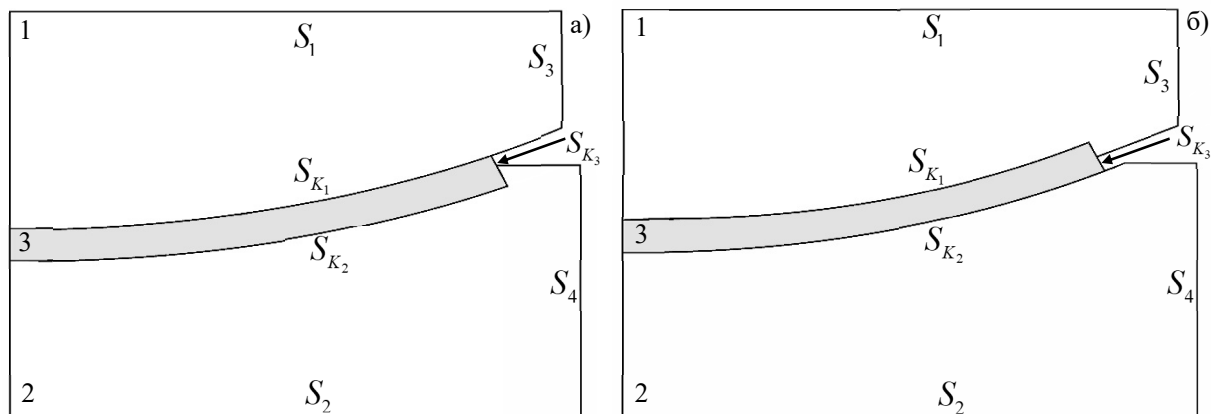


Рис. Расчетные схемы сферических опорных частей мостов:
а) прослойка, расположенная в нижней плите; б) прослойка, нанесенная на сферический сегмент.

Задача реализована в осесимметричной постановке, в рамках общей математической постановке контактного взаимодействия двух упругих тел (1-2) через упругопластическую прослойку (3) [2], дополненную учетом больших деформаций в объеме материала слоя скольжения. В рамках исследования выполнена оценка влияния угла наклона антифрикционной прослойки (3) от 0 до 45° на деформирование конструкции. В качестве материалов слоя скольжения рассмотрено 6 полимерных материалов и композитов с табличным значением коэффициента трения по поверхностям сопряжения и 3 материалов с полученными экспериментально фрикционными свойствами с учетом и без учета смазки. Ранее было проведено исследование о влиянии угла наклона торца фрикционного слоя скольжения на работу конструкций сферических опорных частей. Для модели с прослойкой, расположенной в нижней стальной плите, наиболее благоприятное распределение параметров зон контакта наблюдается при углах наклона торца 25 и 40°. Для модели с прослойкой, нанесенной на сферический сегмент – при угле наклона торца 0°. Исследования влияния свойств материалов антифрикционной прослойки выполнено при углах наклона торца 25, 30 и 40° для модели рис. 1,а и 0 и 30° для модели рис. 1,б., где 30° стандартный угол наклона торца.

В рамках серии численных экспериментов установлены материалы, при которых конструкции сферических опорных частей подвержены меньшему деформированию.

1. Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Tribology and biophysics of artificial joints. Elsevier. 2006. 350 p.

2. Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 1. С 54-61.

О ВЛИЯНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩЕГО МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКНА ТИПА PANDA

Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, А.А. Каменских

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: ulesig@gmail.com

Сейчас трудно представить нашу жизнь без волоконной оптики, ведь оптические волокна вошли во многие сферы нашей жизни. По всему миру изготавливают миллиарды километров различных типов волокон в год, и каждое волокно проходит множество испытаний, прежде чем попасть к потребителю. На ПАО «ПНППК» (Пермь) изготавливают анизотропное одномодовое оптическое волокно типа Panda. Оно используется для изготовления чувствительного контура волоконно-оптического гироскопа, рабочий диапазон температур которого составляет $-60 \div 60$ °С.

Чтобы волокно соответствовало заявленным требованиям, в технологии изготовления предусмотрены различные испытания. В рамках одного из таких испытаний волокно с натягом наматывается на алюминиевую катушку и подвергается термоциклированию, во время которого контролируются оптические характеристики.

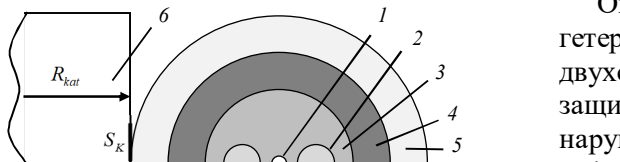


Рис. 1 Схема поперечного сечения волокна.

- 1 – светопроводящая жила (SiO_2 , легированный GeO_2),
- 2 – силовой стержень (SiO_2 , легированный B_2O_3 и P_2O_5),
- 3 – основной материал волокна (SiO_2),
- 4 – внутренний ЗУП, 5 – внешний ЗУП,
- 6 – алюминиевая катушка.

Оптическое волокно типа Panda (рис. 1) – это гетерогенная конструкция из кварцевых стекол и двухслойного УФ-отверждаемого полимерного защитно-упрочняющего покрытия (ЗУП). В условиях нарушения термостатики на оптические и деформационные характеристики такой конструкции могут влиять различные факторы, например, существенные отличия коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) как внутри кварцевой части волокна, так и с материалами ЗУП. Поэтому правильный учет физических свойств этих материалов очень важен для понимания процессов, происходящих в волокне.

Некоторые исследования [1], связанные с определением деформационных и оптических характеристик волокон, рассматриваются в рамках значительных упрощений геометрической конфигурации: без учета геометрии сечения, с использованием осредненных свойств и т.д.

В рамках предварительного анализа было выполнено исследование влияния термосилового воздействия на напряженно-деформированное состояние в анизотропном волокне и на его оптические характеристики, при однорядной силовой намотке на алюминиевую катушку при циклическом изменении температуры по заданному закону в диапазоне от -60 до 60 °С при постоянных значениях КЛТР ЗУП.

Известно, что на термомеханические свойства полимеров существенно влияет изменение температуры [2]. В данной работе была учтена зависимость КЛТР материалов ЗУП от температуры. Установлено влияние зависимости КЛТР материалов ЗУП от температуры на работу конструкции оптического волокна типа Panda: деформационные и оптические характеристики в центре светопроводящей жилы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

1. Есипенко И.А., Лыков Д.А. Численный расчет и экспериментальная верификация фиктивной угловой скорости волоконно-оптического гироскопа при нестационарном температурном воздействии на его контур // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 3. С. 313-323.

2. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров: Учебное пособие. М.: Высшая школа. 1983. – 391 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТКАНЕЙ ГЛАЗА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Р.В. Кароткиян

Донской Государственный Технический Университет

e-mail: valker94@gmail.com

Одна из основных задач офтальмологии на сегодняшний день является исследование механических характеристик тканей глаза, знание которых позволяет предвидеть группу заболеваний, связанных непосредственно с дегенеративными заболеваниями глаза, в первую очередь к таким заболеваниям относятся кератоконус и дистрофия, которые в отсутствии терапии приводят к ухудшению и потере зрения. Так же при получении данных характеристик, появляется возможность уменьшить риски во время проведения межслойной рефракционной кератопластики – пересадки части роговицы донора между слоями роговицы пациента – требует предварительного исследования напряженно-деформированного состояния роговицы под действием внутриглазного давления. В этом случае можно построить оболочечную расчетную схему с использованием нескольких базовых поверхностей. В основе модели лежит кинематическая гипотеза, по которой пространственное поле деформации оболочки определяется деформацией нескольких базовых поверхностей, а также операций по восстановлению отдельных тканей роговицы.

Изучение механических характеристик тканей глаза, так же важно для разработки новых биосовместимых материалов, используемых для создания новых видов имплантов, а также возможности прогнозирования осложнений, что позволяет выбрать метод операции.

В настоящей работе предложен метод исследования механических характеристик, путем рассмотрения топологических особенностей слоев роговицы глаза, а также соседних тканей. Данная методика учитывает особенности клеточного строения мягких тканей глаза, а также предполагает возможность рассмотрения клеточного строения отдельных слоев, таких как: передний эпителий, передняя пограничная мембрана (Боуменова), строма, слой Дюа, задняя пограничная оболочка (Десцеметова оболочка), задний эпителий.

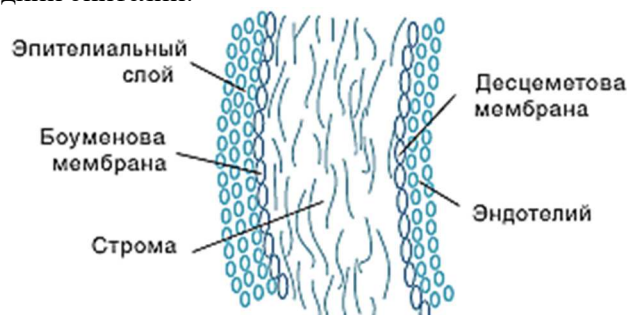


Рис. Строение роговицы глаза.

В качестве образцов, для отработки методики, использовались энуклеированные глазные яблоки кроликов, предоставленные Ростовским государственным медицинским университетом (РостГМУ). Исследования проводились с разрешения этического комитета РостГМУ. Топология поверхности роговицы была получена с помощью атомно-силового сканирующего микроскопа NanoEducator (NT-MDT, Россия). Наведение проводилось при помощи позиционирующей микроскопии. Для сканирования использовались зонды с вольфрамовым наконечником, заточенные электро-химическим способом. Для обработки полученных результатов, использовалась программная среда Gwyddion.

Исследование выполнено при поддержке Правительства Российской Федерации (грант 14.Z50.31.0046). Сканирующая микроскопия проведена в РЦКП НОЦ “Материалы” ДГТУ (<https://nano.donstu.ru>)

1. Sadyrin, E., Karotkiyan, R., Sushentsov, N., Stepanov, S., Zabiya, I., Kislyakov, E., & Litvinenko, A. (2020). Mechanical Properties Derived by Spherical Indentation of TiN Coating Deposited by a Method Combining Magnetron Sputtering and Arc Evaporation. In *Advanced Materials* (pp. 85-95). Springer, Cham.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

О.В. Матвиенко, Д.П. Касымов, Е.Л. Лобода, А.В. Луценко

Национальный исследовательский Томский Государственный Университет

e-mail: matvolegv@mail.ru, denkasymov@gmail.com, loboda@mail.tsu.ru, anastas_mex_mat434@mail.ru

В настоящее время существует множество математических моделей лесных пожаров, но только небольшая их часть учитывает вклад горящих и тлеющих частиц в распространение пожара. При этом расчёты основываются на приблизительных характеристиках, так как точных данных до сих пор не существует.

Для тестирования и верификации разрабатываемой математической модели, предложенной в статье [1], для моделирования процесса зажигания древесины горящими частицами, образовавшимися в результате горения фронта низового лесного пожара, была проведена серия экспериментов по определению вероятности воспламенения и времени зажигания образцов древесины в результате одиночной частицы, а также группы частиц. Методика проведения эксперимента и лабораторное оборудование представлены в [2].

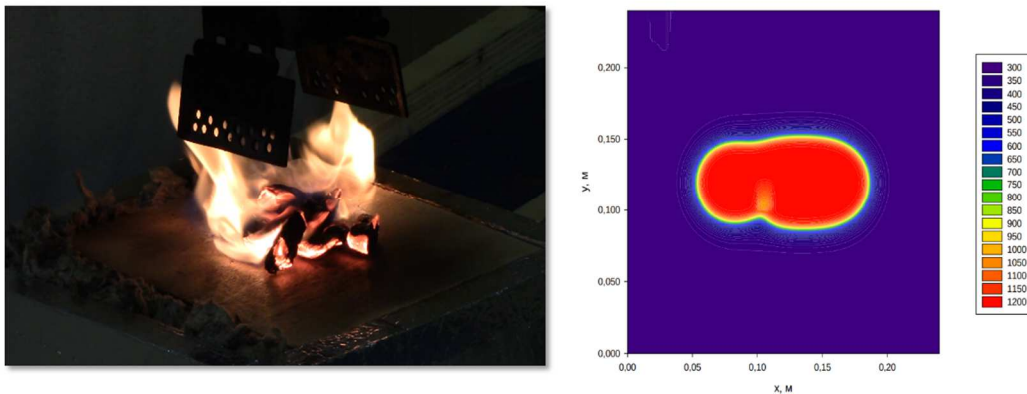


Рис. 1. Типичная картина в зоне взаимодействия частиц с образцами древесины (слева – фото с эксперимента, справа – результаты численного расчета).

В результате математического моделирования зажигания слоя лесных горючих материалов (ЛГМ) тлеющими сосновыми веточками, а также сравнения с результатами проведенного эксперимента установлено [3], что для инициирования процесса зажигания тлеющая частица должна обладать значительной тепловой энергией. Для частиц малых размеров, запасенного в них тепла оказывается недостаточным для инициирования пиролиза и зажигания. Если размеры частицы достигают критического значения, то в прилегающей к ней области начинается процесс пиролиза. Смешение продуктов пиролиза с атмосферным кислородом приводит к вспышке, сопровождаемой резким, пикообразным ростом температуры. После выгорания газообразных продуктов пиролиза в данной области пространства режим горения сменяется режимом тления. При этом зона пиролиза распространяется во внешнюю по отношению к частице область. Если размеры частицы достаточно большие, то после зажигания слоя ЛГМ возникает режим пламенного горения в газовой фазе.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10068).

1. Matvienko O. V., Kasymov D. P., Filkov A. I., Daneyko O. I., Gorbatov D. A. Simulation of fuel bed ignition by wildland firebrands. *International Journal of Wildland Fire* // 2018. V. 27. P. 550–561. DOI: 10.1071/WF17083 .

2. Тараканова В.А., Касымов Д.П. Изучение в лабораторных условиях взаимодействия горящих и тлеющих частиц природного происхождения с плоской поверхностью различных строительных материалов из древесины // Всероссийская молодежная научная конференция «Все грани математики и механики» : сборник статей. Томск: Издательский Дом ТГУ. 2019. С. 64–76.

3. Kasymov D. P., Tarakanova V. A., Martynov P. S., Agafontsev M. V. Studying firebrands interaction with flat surface of various wood construction materials in laboratory conditions // *Journal of Physics: Conference Series*. 11/2019; 1359:012092. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012092.

ЛАБОРАТОРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ, ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

О.К. Зайченко^{1,2}, В.М. Кац¹, В.А. Морозов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²КБ «Кибершельф», Санкт-Петербург

e-mail: v.kats@spbu.ru

Бурное развитие космической техники, энергетики, микромеханики и других современных отраслей промышленности требует разработки новых подходов к экспериментальному моделированию процессов высокоскоростного нагружения, деформирования и разрушения.

Важной представляется разработка методик, обеспечивающих контролируемое динамическое нагружение и получение условий, аналогичных хорошо изученным при статических испытаниях (одноосное растяжение, чистый сдвиг и т.п.). Также к разрабатываемым методикам предъявляются требования по экологичности, безопасности труда, ограничению энергоемкости и т.д.

В докладе освещены развиваемые и применяемые нами подходы к экспериментальному исследованию динамических процессов, основанных на различных электрофизических эффектах, включающих воздействие потоками частиц, электрический взрыв проводника, электропробой, разнообразные магнитоимпульсные эффекты.

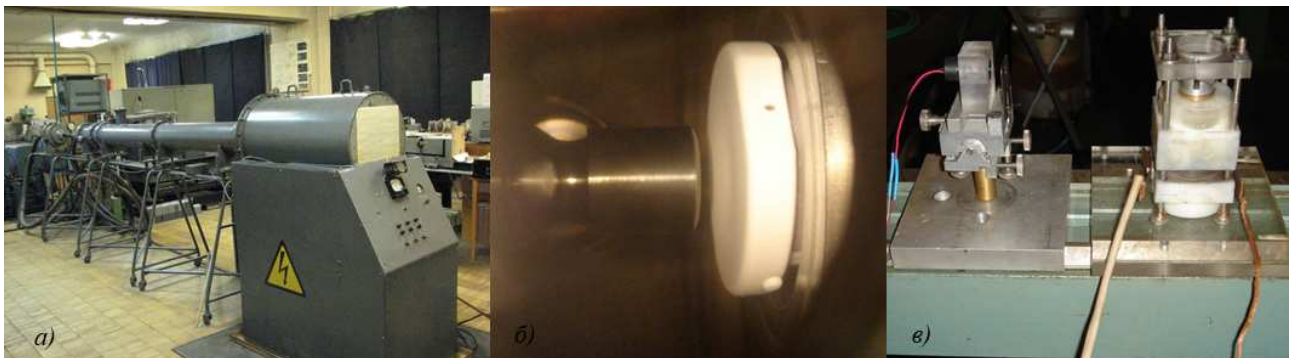


Рис. Генератор коротких высоковольтных импульсов (а); воздействие потока ионов ксенона на установленную внутри катода вакуумного диода мишень (б); разгон снаряда электрическим взрывом проводника (в).

1. Atroshenko S.A., Morozov V.A., Kats V.M., Griбанова D.A., Petrov Yu.V. Rupture of copper rings by a magnetic-pulse method over a wide range of loading times // *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 13. P. 1373-1377.

2. Смирнов И.В., Springhetti R., Морозов В.А., Лукин А.А. Экспериментальное исследование электрической прочности акриловой ленты VHV при квазистатическом и импульсном напряжениях // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. № 1. С. 151-153.

3. Морозов В.А., Кац В.М., Лукин А.А., Федосеенко С.И. Инициирование и взаимодействие с преградой импульсного пучка ионов ксенона // *Шестые Поляховские чтения: Тезисы докладов международной научной конференции по механике*. 2012. С. 231.

4. Морозов В.А., Богатко В.И., Атрошенко С.А., Кац В.М., Газизуллина А.Р. Нагружение, деформирование и разрушение цилиндрических образцов из полиметилметакрилата и фторопласта с использованием электрического взрыва проводников // *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. № 2. С. 233-237.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ В OPENFOAM® V2012

М.А. Кирюшина¹, Д.А. Рязанов²
¹ ИПМ РАН им. М.В. Келдыша, Москва
² ИСП РАН им. В.П. Иванникова, Москва
e-mail: m_ist@mail.ru¹, ryazanov@ispras.ru²

Instructors: Kiryushina Maria Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (Russia), Ryazanov Daniil Ivannikov Institute for System Programming of the RAS (Russia)

Software stack: **OpenFOAM v2012**

Developers of this session:

- M. V. Kraposhin, Russia
- M. A. Kiryushina, Russia
- D. A. Ryazanov, Russia

Development team website: <https://github.com/unicfdlab>

Одним из методов численного моделирования задач газовой динамики является использование регуляризованных уравнений, которые представляют собой обобщение уравнений Навье-Стокса в рамках квазигазодинамического подхода. Данное направление имеет широкий спектр практического применения, а также большой исследовательский потенциал. Для расширения возможностей работы с регуляризованными уравнениями была создана библиотека КГД/КГиД методов на базе открытой платформы OpenFOAM.

В данном учебном треке рассматривается реализации КГД численного алгоритма – решатель **QGDFoam**, построенный на базе квазигазодинамических уравнений и включенный в открытый комплекс OpenFOAM.

Цель данного учебного трека – рассказать об особенностях и возможностях представленного решателя, дать навыки работы с ним на тестовых примерах.

Будут затронуты следующие вопросы:

- а) описание базовых принципов работы решателя;
- б) настройка входных параметров;
- в) запуск численных расчетов на тестовых примерах.

Результатом работы на учебном треке будет являться сборка решателя, а также подготовка и запуск тестовых примеров.

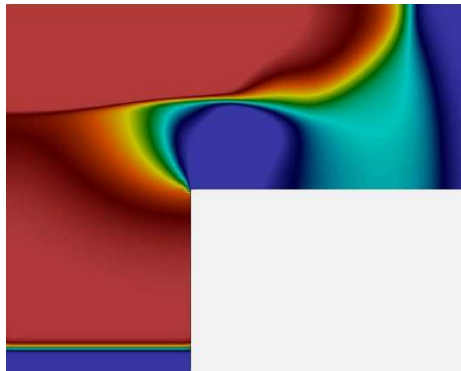


Рисунок.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-11-00169.

1. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. - Москва, Научный мир, 2007.

2. M.V. Kraposhin, D.A. Ryazanov, E.V. Smirnova, T.G. Elizarova, M.A. Kiryushina (Istomina). Development of OpenFOAM Solver for Compressible Viscous Flows Simulation Using Quasi-Gas Dynamic Equations // Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS). 2017. P. 117–123. DOI: [10.1109/ISPRAS.2017.00026](https://doi.org/10.1109/ISPRAS.2017.00026).

ДИНАМИКА МНОГОФАЗНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛОСТЯХ

В.С. Кобелева, Ю.С. Дементьева, В.Г. Козлов
Лаборатория вибрационной гидромеханики, ПГГПУ, Пермь
e-mail: kobvika1999@gmail.com

Экспериментально исследуется динамика трехжидкостной системы в неравномерно вращающемся щелевом зазоре с круговой боковой границей. Одна из жидкостей имеет высокую вязкость, ее плотность имеет среднее значение по сравнению с двумя маловязкими жидкостями. При быстром вращении под действием центробежной силы в зазоре устанавливается осесимметричное распределение жидкостей с двумя концентрическими границами раздела. Целью является изучение динамики такой системы при модуляции скорости вращения. Варьируются скорость вращения, амплитуда и частота модуляции скорости вращения, физические параметры и объемы фаз.

Мотивация исследований определяется обнаруженным в [1] явлением образования квазистационарного периодического пространственного рельефа на осесимметричной границе раздела двух жидкостей с высоким контрастом вязкостей. Граница теряет устойчивость пороговым образом при повышении амплитуды модуляции скорости вращения. Показано, что обнаруженная неустойчивость связана с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца и возбуждается в результате осциллирующего движения маловязкой жидкости вблизи межфазной границы. Настоящие исследования являются продолжением вышеупомянутой работы. Скорость вращения изменяется со временем по закону $\Omega = \Omega_{rot} (1 + \varepsilon \cos \Omega_L t)$. Здесь Ω_{rot} – скорость вращения полости, а Ω_L и ε – круговая частота и безразмерная амплитуда либраций. Рабочей полостью является щелевой зазор толщиной $d = 5.0$ мм с круговой боковой границей радиусом $R_c = 7$ см. Вращение задается вокруг оси симметрии полости.

Обнаружено, что в зависимости от относительного объема и свойств жидкостей на границах раздела (на одной из них, или на обеих сразу) пороговым образом возникает сравнительно коротковолновый рельеф, природа которого согласуется с обнаруженным в [1]. В случае малого объема вязкой фазы возможно ее эмульгирование, что качественно меняет свойства системы. На Рис. 1 (фрагмент *а*) показано распределение фаз в поле центробежной силы до порога потери устойчивости осесимметричного распределения. В экспериментах использовались флуоринерт FC-40, касторовое масло (подкрашенное зеленым красителем) и силиконовое масло ПМС-5. Маловязкое масло, имеющее наименьшую плотность, располагается вблизи оси вращения. На фрагменте *б* представлена фотография системы трех жидкостей в надкритической области. Изменение свойств системы приводит к резкому возрастанию длины волны квазистационарного рельефа на границе.

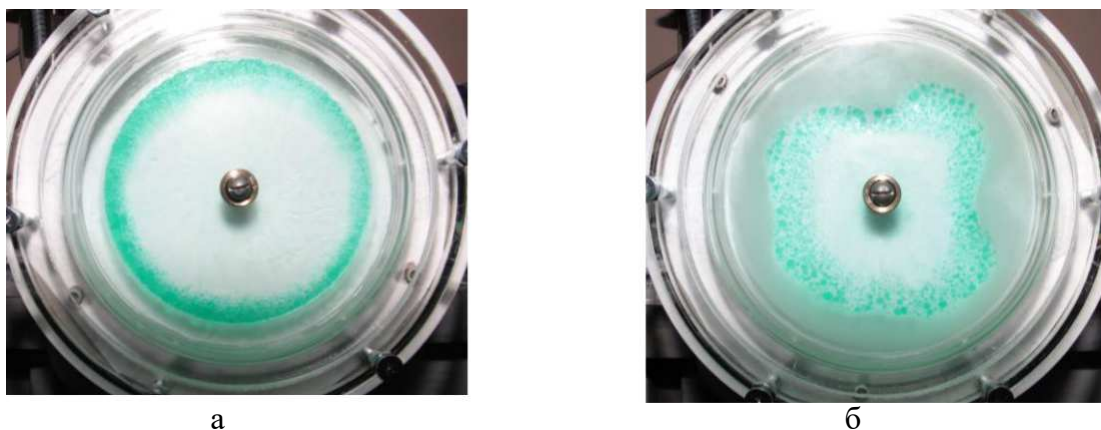


Рис. 1. Фотографии границы раздела жидкостей при частоте вращения $f_{rot} = 2.5$ об/с и частоте модуляции $f_L = 6$ Гц; фрагменты, а) и б) соответствуют $\varepsilon = 0.2$ и 0.36 .

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (проект Научных школ С26/119).

1. Kozlov V.G., Dementieva J.S., Kobeleva V.S., and Petuhova M.A. Stability of interface between liquids with high viscosity contrast in unevenly rotating cavity // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1809. 012022. DOI: /10.1088/1742-6596/1809/1/012022.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ПАРОГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА НА ПОВЕРХНОСТИ АКРИЛА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ NaCl И ПАВ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

М.В. Козлов², Т.П. Любимова^{1,2}, К.А. Рыбкин^{1,2}, М.О. Кучинский^{1,2}, О.О. Фатталов^{1,2}

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Пермский государственный университет, Пермь

e-mail: cozlov.maks@mail.ru

Под действием ультразвука в жидкостях возникают кавитационные пузырьки, затем вследствие коалесценции образуют парогазовые пузырьки, поведение которых широко исследуется в литературе [1, 2]. Настоящая работа является продолжением исследования [3], посвященного воздействию ультразвука на солевые растворы.

В настоящей работе исследована динамика роста одиночного пузырька на поверхности акрила в дистиллированной воде, в водных растворах NaCl с концентрацией 0.1, 0.2 и 0.3 mol, а также в воде при наличии поверхностно-активного вещества sodium dodecyl sulfate (SDS) в сонохимическом реакторе флотационной машины ФМЛ-1 при ультразвуковом воздействии на жидкость с частотой 28 кГц.

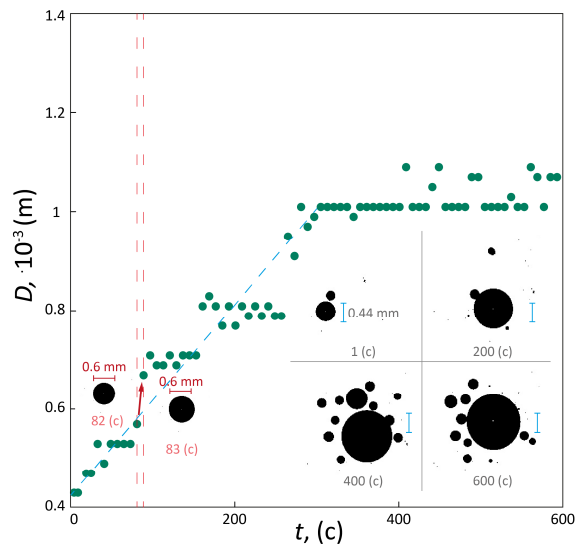


Рис. Рост парогазового пузырька на поверхности акрила в дистиллированной воде.

В экспериментах наблюдались закрепление и дальнейший рост одиночного пузырька на стенке сонохимического реактора, который был изготовлен из акрилового стекла толщиной 3 мм. Динамика роста одиночного пузырька в экспериментах фиксировалась с помощью оптической системы регистрации данных, которая состояла из камеры Basler acA1920-155um с объективом TC2MHR036-C и коллимированного источника монохроматического света. Эксперименты показали, что размеры и динамика роста одиночного пузырька зависят от наличия ПАВ и солей в водных растворах. Так, в дистиллированной воде, наблюдается увеличение среднего диаметра пузырька, на фоне его периодических осцилляций вследствие УЗ воздействия. В растворах солей и ПАВ различной концентрации, в связи уменьшением интенсивности коалесценции пузырьков, скорость роста пузырька падает, кроме того максимальный размер закрепившегося на поверхности пузырька существенно уменьшается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

1. Wu J., Nyborg W. L. Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells // Advanced drug delivery reviews. – 2008. – Т. 60. – №. 10. – С. 1103-1116.

2. Xu Z. Numerical simulation of the coalescence of two bubbles in an ultrasound field // Ultrasonics sonochemistry. – 2018. – Т. 49. – С. 277-282.

3. Rybkin K. A. et al. Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 879. – №. 1. – С. 012026.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ С АНОМАЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ СОРЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ КОЛОННЕ

С. В. Козлова¹, И. И. Рыжков^{1,2}, М. М. Боу-Али³

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

³ Университет Мондрагона, Испания

e-mail: sonique@icm.krasn.ru

Термодиффузия (эффект Соре) – перенос массы компонентов смеси под действием разности температур. Данный эффект место во многих природных и технологических процессах. Термодиффузионная колонна – это экспериментальная установка для измерения коэффициентов термодиффузии. Корректные измерения возможны только при устойчивом конвективном движении смеси в колонне. Математическое моделирование позволяет наиболее полно описать термодиффузионный процесс, а также объяснить некоторые экспериментальные наблюдения [1]. В данной работе выполнено трехмерное численное моделирование разделения бинарной смеси этанол – вода с аномальным эффектом Соре в цилиндрической термодиффузионной колонне.

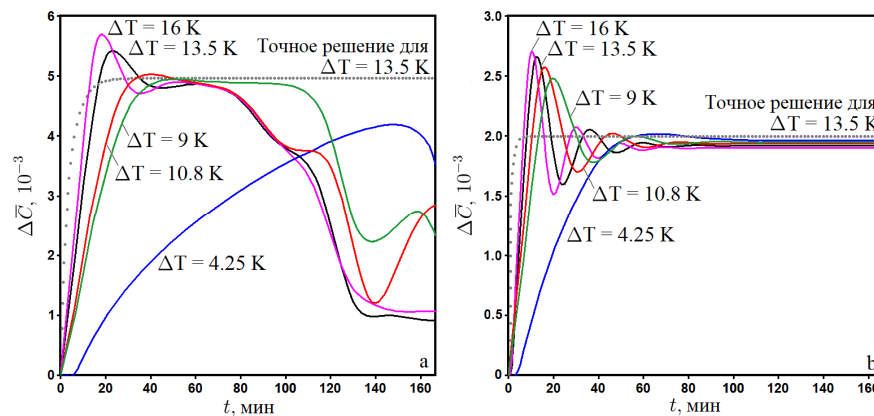


Рис. 1. Эволюция разности средней концентрации этанола между нижним и верхним концами колонн (результаты численного моделирования): (а) колонна I, (б) колонна II.

Средняя массовая доля этанола для исследуемой смеси равна 0.2204. При данной концентрации смесь обладает аномальным эффектом Соре. (более тяжелый компонент смеси – вода – накапливается в верхней части колонны, создавая потенциально неустойчивую стратификацию. Численное моделирование выполнено в программе Ansys Fluent 14.5 для двух колонн с разными зазорами между стенками и одинаковой высотой. Параметры колонн, физические свойства смеси и приложенные разности температур между стенками взяты из эксперимента, выполненного в университете Мондрагона (Испания) [1].

Результаты моделирования показывают, что разделение смеси зависит от параметров колонны (ширина зазора, отношение радиусов цилиндров). Согласно численному расчету, конвективное течение смеси в колонне I (рис. 1а) является всегда неустойчивым. Экспериментальные наблюдения для колонны II показывают, что конвективное течение и разделение смеси в ней устойчиво при достижении разности температур между стенками некоторого критического значения. Численное моделирование для этой колонны (рис. 1б) показывает, что разделение смеси устойчиво при всех приложенных разностях температур. Результаты исследования опубликованы в работе [2].

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

1. M. M. Bou-Ali, O. Ecenarro, J. A. Madariaga et al. Stability of convection in a vertical binary fluid layer with an adverse density gradient // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. № 1. P. 1250-1252.

2. Kozlova, Sofia V., Ryzhkov, Ilya I. and Bou-Ali, M. Mounir // Modeling of separation in a binary mixture with negative Soret effect in a cylindrical thermogravitational column. J. Non-Equil. Thermodyn. 2021. V. 46. № 2. P. 109-120.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНКИ ОХЛАДИТЕЛЯ ПРИ ВДУВЕ В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК

А.А. Колесова¹, Е.Г. Колесова², М.Н. Жорник², С.В. Веретенников¹

¹Рыбинский государственный авиационный технический институт им. П.А. Соловьева, Рыбинск

²ПАО «ОДК Сатурн», Рыбинск

e-mail: kolesova599@gmail.com

Большинство работ, посвященных изучению пленочного охлаждения, представляют собой результаты экспериментальных исследований, проведенных на плоской поверхности с различными сочетаниями углов, форм отверстий и их взаимного расположения друг относительно друга. Причем практически все работы такого типа посвящены исследованию эффективности пленочного охлаждения при дозвуковом течении основного потока. Однако в инженерной практике случаются случаи, когда режим течения при обтекании профиля лопаток переходит сверхзвуковой барьер, что особенно актуально для поверхности спинки высокоперепадных турбин. Изучению данной проблемы и посвящена данная работа.

В обеспечение экспериментальных исследований по данной теме в работе выполнено численное исследование в ANSYS с рекомендациями из [1, 2]. Расчеты выполнены на выпуклой поверхности, форма которой повторяет поверхность лопатки двигателя и обеспечивает сверхзвуковой режим течения в канале, а также структуру течения в реальном межлопаточном канале на расстоянии в 20 калибров (20d) от выдува отверстий перфорации. Перед сужающимся участком основного канала, выполнены отверстия для выдува вторичного воздуха моделирующие отверстия перфорации на спинке сопловой лопатки. В работе исследованы следующие формы отверстий, расположенных под углом 30° к поверхности основного канала: 1 - цилиндрические отверстия; 2 - веерные отверстия fan-shape с длиной расширяющегося участка 1d; 3 - отверстия laidback; 4 - отверстия fan-shape с длиной расширяющегося участка 3d; 5 - с отверстиями fan-shape laidback (длина расширяющегося участка fan-shape – 2d, laidback – 1d). Все отверстия имеют диаметр 0,8 мм и относительный шаг 3,5d.

Результаты расчетов по определению эффективности пленочного охлаждения для разных типов рассмотренных отверстий и параметрах вдува $m=1$ и 2 представлены на рисунке 1.

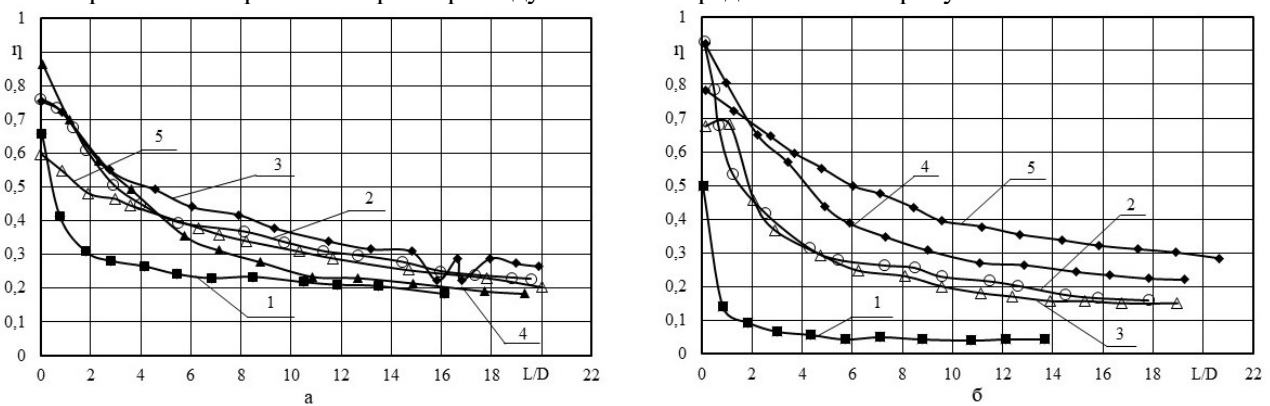


Рисунок 1. Эффективность пленочного охлаждения при а – $m=1$, б – $m=2$.

1 – отверстия №1; 2 - №2; 3 - №3; 4 - №4; 5 - №5.

Эффективность пленочного охлаждения при параметре вдува $m < 1.5$ на отверстиях различной формы практически идентичны, при $m > 1.5$ отверстия 4 и 5 имеют наибольшую эффективность.

1. Колесова А.А. Расчетно-экспериментальное исследование пленочного охлаждения // Тезисы докладов XLVI Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2020»: Сборник тезисов докладов. МАИ, 2020. 160 с.

2. Халатов А.А. Термогазодинамика сложных потоков около криволинейных поверхностей. Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 1999.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ ПАРЫ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

В.С. Корниенко¹

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

e-mail: vika-svetlakova@yandex.ru

Принципиальная возможность поэтапной сборки наноструктуры predetermined формы [1] порождает интерес к механике установления ориентационного равновесия для предварительно сформированной пары частиц. Как известно, под действием внешнего поля ансамбль частиц стремится занять положение, соответствующее минимуму потенциальной энергии его взаимодействия с полем. Внешнее электромагнитное поле вызывает поляризацию на каждой частице, и взаимодействие этих поляризаций имеет тенденцию выравнять частицы вдоль направления внешнего поля, которому противодействует тепловое движение. В результате действия этих двух процессов устанавливается определенное равновесное распределение пространственной ориентации наночастиц. Оно носит статистический характер и зависит от механизма взаимодействия ансамбля с внешним полем. Ориентация частиц в переменном поле связана с определенными временами релаксации, которые зависят от вязкости и температуры среды, а также от геометрической структуры образцов.

Таким образом, работа посвящена численному анализу процесса установления ориентационного равновесия пар наночастиц в лазерном поле. Предложенная в работе методика позволяет перенести хорошо анализируемые аналитически модели, справедливые при некоторых ограничениях, на общий случай. Показано, что процесс установления ориентационного равновесия может быть описан шестью обыкновенными дифференциальными уравнениями, что позволяет как численно оценить время установления, так и предсказать положение пары через заданный промежуток времени, в том числе в отсутствие внешнего излучения. Было также получено статистическое распределение по ориентациям для частиц CdTe в поле умеренного лазерного излучения и оценено среднее время установления ориентационного равновесия.

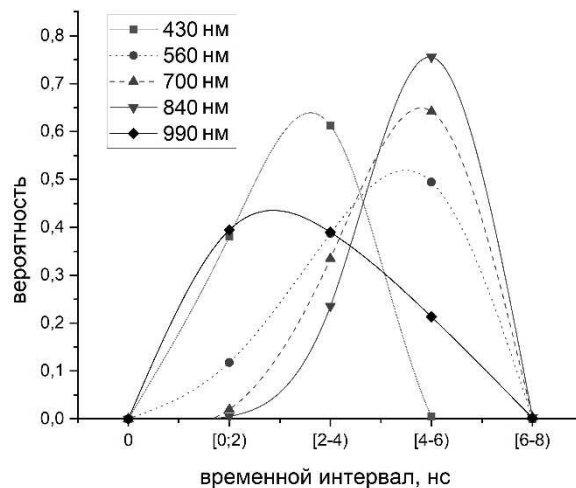


Рис. Вероятность попадания времени установления ориентационного равновесия в установленный временной интервал в зависимости от длины волны внешнего излучения для сферических частиц CdTe радиусом 3 нм.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

1. Kornienko, V.S., Tsipotan, A.S., Aleksandrovsky, A.S., Slabko, V.V. Brownian dynamics of the self-assembly of complex nanostructures in the field of quasi-resonant laser radiation // Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2019, V. 35, № 100707.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ В РЕШЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

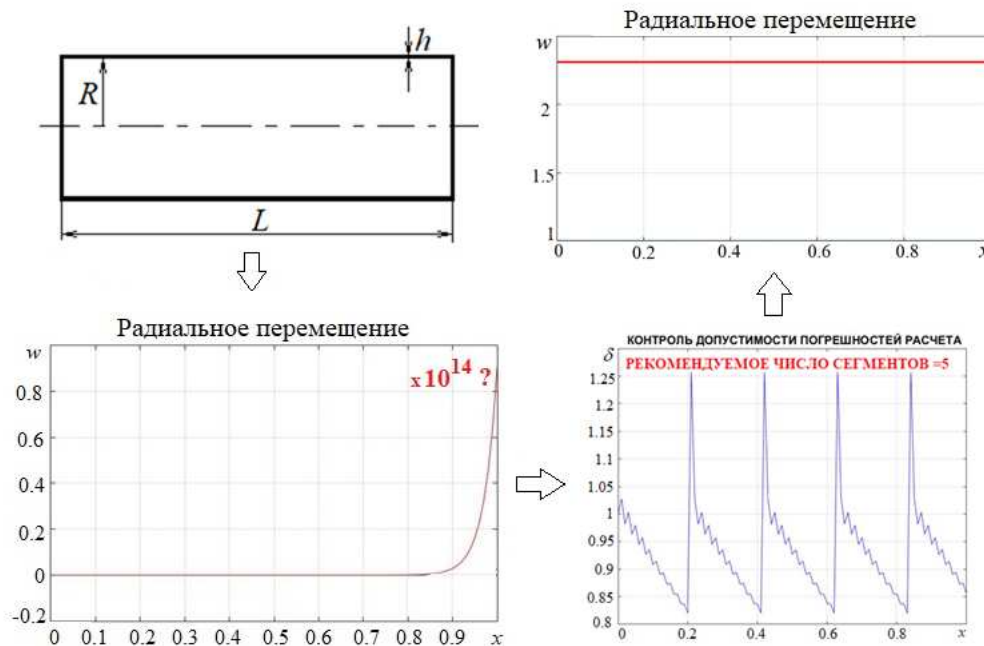
Е.А. Коровайцева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: katrell@mail.ru

В работе предлагается использование метода автоматической сегментации для контроля точности решения нелинейных краевых и начально-краевых задач механики тонкостенных конструкций. Суть метода заключается в проверке выполнения математического равенства, доказанного в теории дифференциальных уравнений. Известно, что если в начальной точке интервала интегрирования системы линейных дифференциальных уравнений нормированные интегральные матрицы исходной и сопряженной систем ортогональны, то они будут ортогональны и при любом значении аргумента интегрирования. Поэтому в методе автоматической сегментации для контроля точности решения краевой задачи используется проверка выполнения указанного условия ортогональности.

При решении нелинейных задач предлагается использование метода автоматической сегментации в рамках реализации алгоритма, основанного на применении метода дифференцирования по параметру, т.е. сведении исходной нелинейной задачи к совокупности взаимосвязанных квазилинейной краевой и нелинейной начальной задач. При этом в начале каждого шага по параметру проверяется выполнение условия ортогональности нормированных интегральных матриц исходной и сопряженной систем дифференциальных уравнений, соответствующих квазилинейной краевой задаче, с заданной вычислителем точностью. Сегментация интервала интегрирования проводится в точках, в которых указанное условие нарушается.



Показано применение метода для решения задач как статического, так и динамического деформирования мягкооболочечных конструкций. При этом в последнем случае автоматическая сегментация участка интегрирования проводится в начале каждого шага по времени. Отмечено улучшение сходимости итерационных процессов, а также уменьшение погрешности решения тестовых задач при использовании метода автоматической сегментации.

1. Коровайцев А.В., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А. Решение прикладных линейных одномерных краевых задач с автоматической точностью // Вестник МИТХТ. 2012. Т. 7 № 6. С. 41-45.

2. Коровайцева Е.А. Систематизация одномерных краевых задач механики деформируемого твердого тела // Труды МАИ. 2020. Вып. 110. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=112827>

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КНУДСЕНА НА АСТРОСФЕРЫ: ОТ СВОБОДНО-МОЛЕКУЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ ДО СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

С.Д. Корольков^{1,2}, В.В. Измоленов^{1,2}

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, Московский центр фундаментальной и прикладной математики МГУ, Москва
²ИКИ РАН, Москва

e-mail: Korolkovsergey1998@mail.ru

Межзвёздные атомы оказывают сильное влияние на положение двух ударных волн и тангенциального разрыва в солнечной системе (Рис. 1, см., например [1,2]). В отличие от заряженной компоненты, они способны проникать в гелиосферу и взаимодействовать с солнечным ветром посредством перезарядки. Разница между нейтральной компонентой межзвездной среды и заряженной состоит в том, что длина свободного пробега межзвездных атомов намного больше, чем заряженных частиц. Для межзвездных протонов она составляет примерно 1 а.е., что намного меньше гелиосферного интерфейса (около 150 а.е.), в то время как свободный пробег межзвездных атомов больше (для гелия) или сравним (для водорода) с размером гелиосферы. Поэтому атомы свободно проникают через гелиопаузу. Основным процессом, влияющим на распределение атомов водорода в области гелиосферного интерфейса, является резонансная перезарядка на протонах солнечного ветра и межзвездной среды. При резонансной перезарядке атом водорода отдает электрон протону, происходит обмен импульсом и энергией между заряженной и нейтральной компонентами. Целью нашей работы было оценить влияние перезарядки на астросферный интерфейс. Для различных звёзд - отношение длин свободного пробега атомов к характерным длинам астросфер (число Кнудсена) может быть различным. Мы провели расчёты задачи для различных значений чисел Кнудсена. Межзвёздные атомы рассчитываются с помощью метода Монте-Карло. В нашей самосогласованной модели использованы все преимущества модели [3,4] - высокое разрешение сетки, точное решение задачи о распаде разрыва на границах ячеек (метод Годунова), улучшение аппроксимации схемы с помощью TVD процедуры. Вместе с тем, новым в численной модели является построение расчетной сетки с использованием технологии высокопроизводительного программирования CUDA, позволяющей использовать свыше 100 миллионов ячеек для вычислений. В докладе будут представлены результаты расчетов и, в частности, исследована газодинамическая структура в головной части области взаимодействия.

1. Izmodenov V., Alexashov D., Myasnikov A. Direction of the interstellar H atom inflow in the heliosphere: Role of the interstellar magnetic field //Astronomy & Astrophysics. 2005. Т. 437. №. 3. С. L35–L38.

2. Izmodenov V. V., Alexashov D. B. Magnitude and direction of the local interstellar magnetic field inferred from Voyager 1 and 2 interstellar data and global heliospheric model //Astronomy & Astrophysics. 2020. Т. 633. С. L12.

3. Izmodenov V. V., Alexashov D. B. Three-dimensional kinetic-MHD model of the global heliosphere with the heliopause-surface fitting //The Astrophysical Journal Supplement Series. 2015. Т. 220. №. 2. С. 32.

4. Korolkov S., Izmodenov V., Alexashov D. Numerical modeling of the convective Kelvin-Helmholtz instabilities of astropauses //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Т. 1640. №. 1. С. 012012.

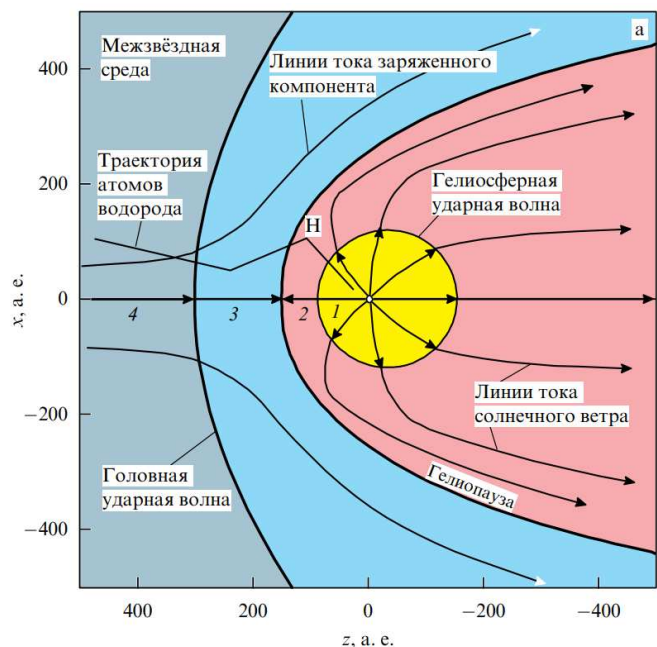


Рис. 1. Картина взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой.

О НОВЫХ ПОДХОДАХ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

П. А. Моссаковский¹, Л. А. Костырева¹, И. В. Инюхин¹, О.П. Королькова¹

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

e-mail: Ol.Shendrigina@mail.ru

Классическая теория эксперимента в механике деформированного твердого тела в подавляющем числе случаев предполагает возможность определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в испытуемых образцах на основании простых соотношений по данным измеряемых в эксперименте силовых и кинематических параметров. Реализация такого рода подходов предполагает, как правило, либо предположение об однородности НДС в рабочей части образца (как в случаях экспериментов на одноосное сжатие-растяжение), либо использование дополнительных кинематических гипотез (в эксперименте на кручение сплошных или толстостенных круговых образцов). Это обстоятельство существенно ограничивает область их применимости.

В настоящее время для исследования поведения конструкций широко используются методы прямого компьютерного моделирования. Надежность получаемых при этом результатов в первую очередь определяется качеством заложенных в расчеты математических моделей материалов (определяющих соотношений и критериев разрушения). Построение адекватных математических моделей, оснащение их материальными параметрами – основная цель экспериментальных исследований в МДТТ. Современный подход к решению задач представляет собой симбиоз натурального и вычислительного (виртуального) эксперимента с последовательным уточнением полученных результатов в рамках специальной процедуры.

В данной работе такого рода подход реализован для построения статических и динамических диаграмм нагружения и идентификации предельных параметров для ряда характерных авиационных сплавов в экспериментах на одноосное растяжение и простое кручение (динамических сдвиг).

Для анализа статического поведения были проведены эксперименты на растяжение (установка Zwick Z100) и на кручение сплошных круговых цилиндрических образцов. В эксперименте на растяжение приведен способ построения кривых деформирования в области неоднородного напряженно-деформированного состояния (НДС) по средствам продолжения начального участка диаграммы, где реализуется однородное НДС, в виде гладкой однопараметрической кусочно-степенной функции. При анализе эксперимента на кручение использовалась модель однородного НДС непосредственно вплоть до разрушения, достоверность которой подтверждает финальное состояние образцов.

Для исследования динамических свойств материала были проведены эксперименты на динамическое сжатие, растяжение и сдвиг с использованием метода разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [1]. Данные, полученные в ходе исследования, дополнялись информацией, полученной методом цифровой корреляции изображений (DIC).

В результате проведенного исследования выявлена скоростная чувствительность материалов: повышение их пределов упругости и снижение касательных модулей с ростом скорости деформаций. Также показано существенное влияние вида нагружения для некоторых материалов как на кривые нагружения, так и на величину предельной деформации.

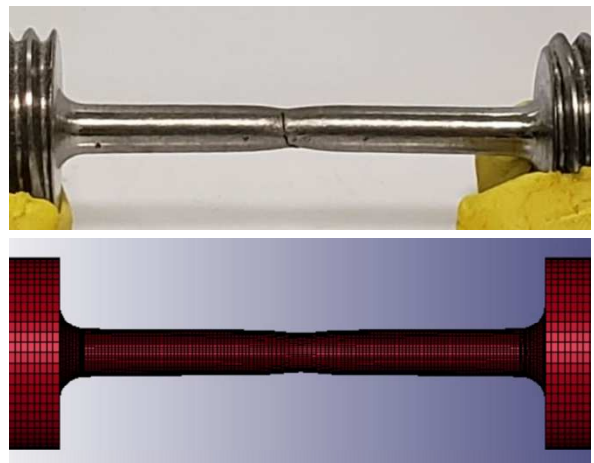


Рис. Образцы на растяжение в натурном и виртуальном экспериментах.

1. Kolsky H. Stress Waves in Solids. – Dover Publications, 1963. – (Dover Books on Physics). – ISBN 9780486610986.

2. Моссаковский П. А., Костырева Л. А. О новом способе экспериментального исследования материалов на динамический сдвиг при высокоскоростном деформировании. – Проблемы прочности и пластичности. – 2018. Т. 80, № 1. С. 127–135.

БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В АОРТЕ ЧЕРЕЗ ТРЕХСТВОРЧАТЫЙ АОРТАЛЬНЫЙ КЛАПАН С УЧЕТОМ ДВУСТОРОННЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

М.В. Кочергин, А.Г. Кучумов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: breakingkeyboard@gmail.com

Неправильное функционирование и физиология трехстворчатого аортального клапана оказывает негативное влияние на системный кровоток в организме человека. Причины нарушения работы клапана могут быть разными: стеноз или неправильное развитие системы кровообращения на эмбриональном этапе, и т.д.

В представленной работе было проведено исследование по зависимости гемодинамики в аортальном клапане в зависимости от формы створок и их биомеханических свойств. Используя результаты мультиспиральной компьютерной томографии, был получен набор геометрии клапанов реальных пациентов. Далее была построена компьютерная модель кровотока в исследуемом участке с учетом двустороннего взаимодействия жидкости и твердого тела [1]. Были получены распределения скоростей, давлений, НДС створок. Исследовалось влияние изменения толщины створок клапана и биомеханических свойств их материала. Результаты работы сравнивались с результатами, полученными в работе [2]. Показано хорошее качественное и количественное совпадение результатов. В дальнейшем планируется сравнительный анализ течения крови в аортальном клапане в норме, при патологии и после хирургического вмешательства для анализа его последствий.

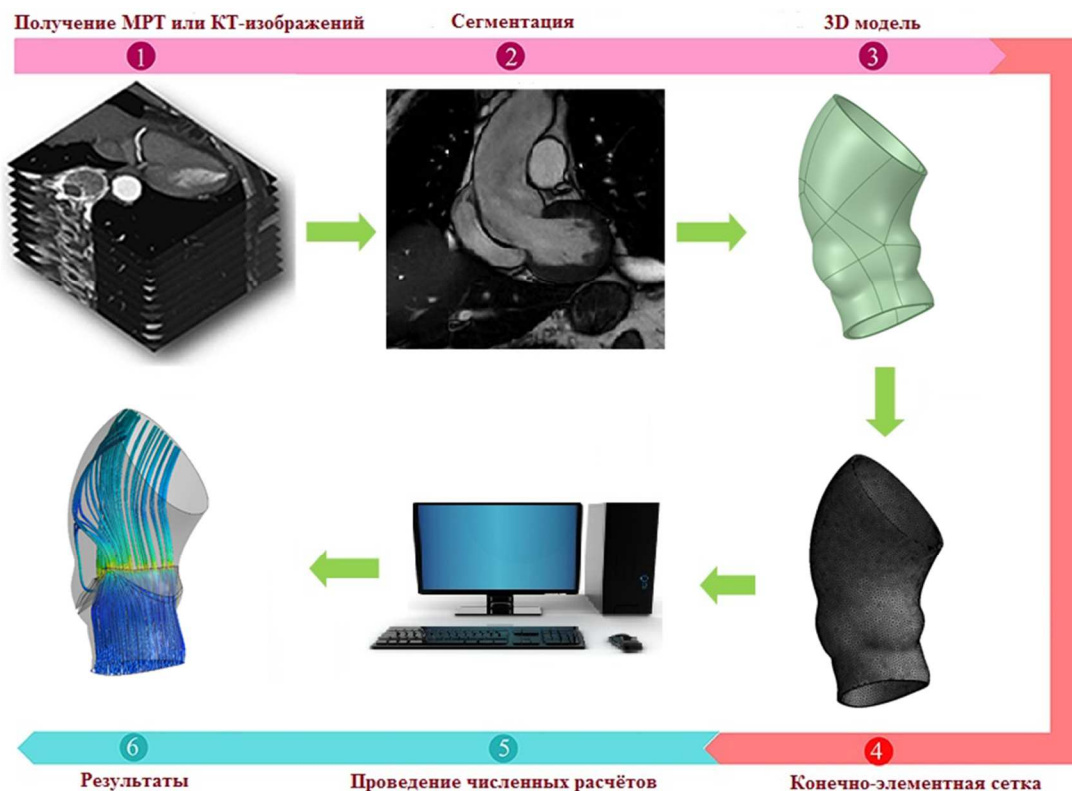


Рис. Этапы проведения численного пациенто-ориентированного моделирования течения в аортальном клапане.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596005.

1.Kochergin, M. Investigation of fluid flow in the curved tube at 1-way and 2-way fluid-structure interaction // Mater's Journal. 2020. Vol. 1. P. 228–239.

2.Gilmanov A., Barker A., Stolarski H., Sotiropoulos F. Image-guided fluid-structure interaction simulation of transvalvular hemodynamics: quantifying the effects of varying aortic valve leaflet thickness // Fluids. 2019. Vol. 4, 119. <https://doi.org/10.3390/fluids4030119>.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ МЕМБРАН С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А.И. Кром¹, И.И. Рыжков^{1,2}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

e-mail: kai@icm.krasn.ru

Мембранные технологии активно развиваются благодаря большому количеству направлений промышленности, использующих процессы мембранного разделения (химическая сенсорика, разделение смесей, преобразование энергии и т.д.). Одной из таких технологий является повышение ионной проводимости мембран, способных менять селективные свойства при изменении направления действия электрического поля.

В данной работе рассмотрены двумерная (2D) модель пространственного заряда и одномерная (1D) модель однородного потенциала [1] движения водного раствора электролита через мембрану с электропроводящей поверхностью при заданном постоянном поверхностном потенциале. Движение раствора вызвано разностью потенциалов между разделяемыми резервуарами. С помощью построенных моделей был проведён подбор наилучшего значения проницаемости слоя Штерна для описания экспериментальных данных, полученных в работе [2]. Результаты численных расчетов представлены на рисунке, где сплошные кривые соответствуют 2D модели, а пунктирные – 1D модели (алгоритм численной реализации моделей см. в [3,4]).

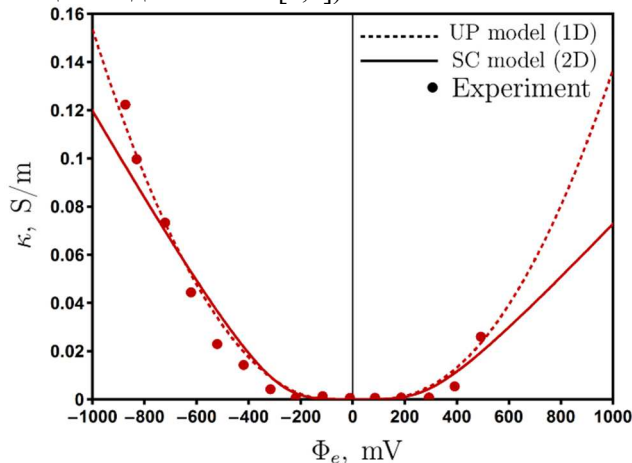


Рис. Ионная проводимость в зависимости от поверхностного потенциала.

Можно видеть, что рассчитанные и экспериментальные зависимости проводимости от поверхностного потенциала хорошо согласуются и показывают качественно одинаковое поведение – рост проводимости с увеличением абсолютного значения поверхностного потенциала, вызванный накоплением протонов (гидроксид-ионов) внутри нанопоры при отрицательных (положительных) значениях потенциала. Несимметричность кривой проводимости относительно линии $\Phi_e = 0$ объясняется разностью коэффициентов диффузии протонов и гидроксид-ионов, а отличие кривых, рассчитанных по 2D и 1D моделям – разными подобранными значениями проницаемости слоя Штерна. Заключаем, что обе модели достаточно хорошо могут согласовываться с экспериментальными данными при удачно выбранных параметрах.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

1. Peters P.B., van Roij R., Bazant M.Z. Analysis of electrolyte transport through charged nanopores // Physical Review E. 2016. V. 93. 053108.

2. Wang Q., Cha C.S., Lu J., Zhuang L. Ionic conductivity of pure water in charged porous matrix // Chemphyschem. 2012. V. 13. PP. 514–519.

3. Ryzhkov I.I., Vyatkin A.S., Mikhlina E.V. Modelling of conductive nanoporous membranes with switchable ionic selectivity // Membranes and Membrane Technologies. 2020. V. 2. PP. 10–19.

4. Krom A.I., Medvedeva M.I., Ryzhkov I.I. Modelling the ionic conductivity of nanopores with electrically conductive surface // J. Siber. Fed. Univer.: Mathematics & Physics. 2021. V. 14. PP. 74-86.

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЭФФЕКТ ГАЛОПИРОВАНИЯ

А.Э. Курбанов

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: azim4fs@gmail.com

Рассматривается электромеханическая система, которая состоит из твердого тела (имеющего форму прямоугольного параллелепипеда), соединенного с помощью пружины с постоянным магнитом. Магнит и тело могут совершать возвратно-поступательное движение вдоль неподвижной горизонтальной прямой. Магнит находится внутри катушки индуктивности, а катушка включена в цепь, выходы которой замкнуты через нагрузочное сопротивление. Соответственно, при движении магнита в цепи возникает электрический ток. Система помещена в стационарный поток среды. Воздействие потока на магнит и катушку считается пренебрежимо малым.

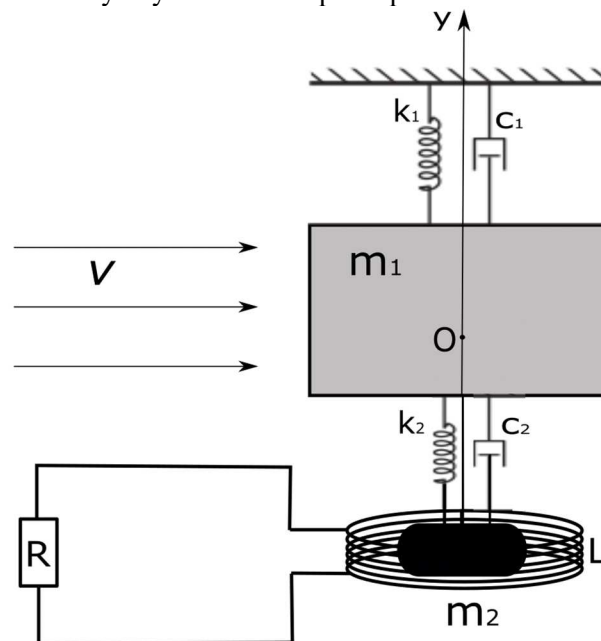


Рис. Модель системы.

Исследована устойчивость положения равновесия. Проведен параметрический анализ, получены достаточные условия устойчивости и неустойчивости. Путем численного моделирования были определены зависимости амплитуды и частоты колебаний тела, а также вырабатываемого тока и мощности от внешнего сопротивления и скорости потока. Показано, что в системе, поведение которой ближе к поведению системы с одной степенью свободы, амплитуда колебаний и вырабатываемая мощность меньше.

1. S. Tornincasa, M. Repetto, E. Bonisoli, F. Di Monaco. Energy harvester for vehicle tires: Nonlinear dynamics and experimental outcomes // Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, vol. 23, pp. 3-13.

2. T. Massai, J. Zhao, D. Lo Jacono, G. Bartoli, J. Sheridan. The effect of angle of attack on flow-induced vibration of low-side-ratio rectangular cylinders // Journal of Fluids and Structures, 2018, vol. 82, pp. 375-393.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

М.О. Кучинский^{1,2}, Т.П. Любимова^{1,2}, О.О. Фатталов^{1,2}, К.А. Рыбкин^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

e-mail: kat6chinskiy@gmail.com

Универсальность использования ультразвука позволяет сочетать его с другими технологиями, доказывая огромный потенциал его использования в различных сферах. Ультразвуковое воздействие нашло применение в таких областях как: материаловедение, химический синтез [1], очистка воды [2], биотехнологии [3].

Исследование проводилось в сонохимическом реакторе флотационной машины ФМЛ - 1, который представлял из себя полость с размерами 110×116×160 мм³, изготовленную из оргстекла толщиной 3 мм. Источник ультразвука располагался заподлицо с дном экспериментальной установки.

Для сонохимического реактора, в воде и растворах NaCl, проведены экспериментальные исследования: относительного акустического давления, с использованием датчика вибраций; скорости возникающих течений, с использованием метода трассерной и флуоресцентной визуализации; интенсивности кавитационных процессов с использованием термодатчиков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

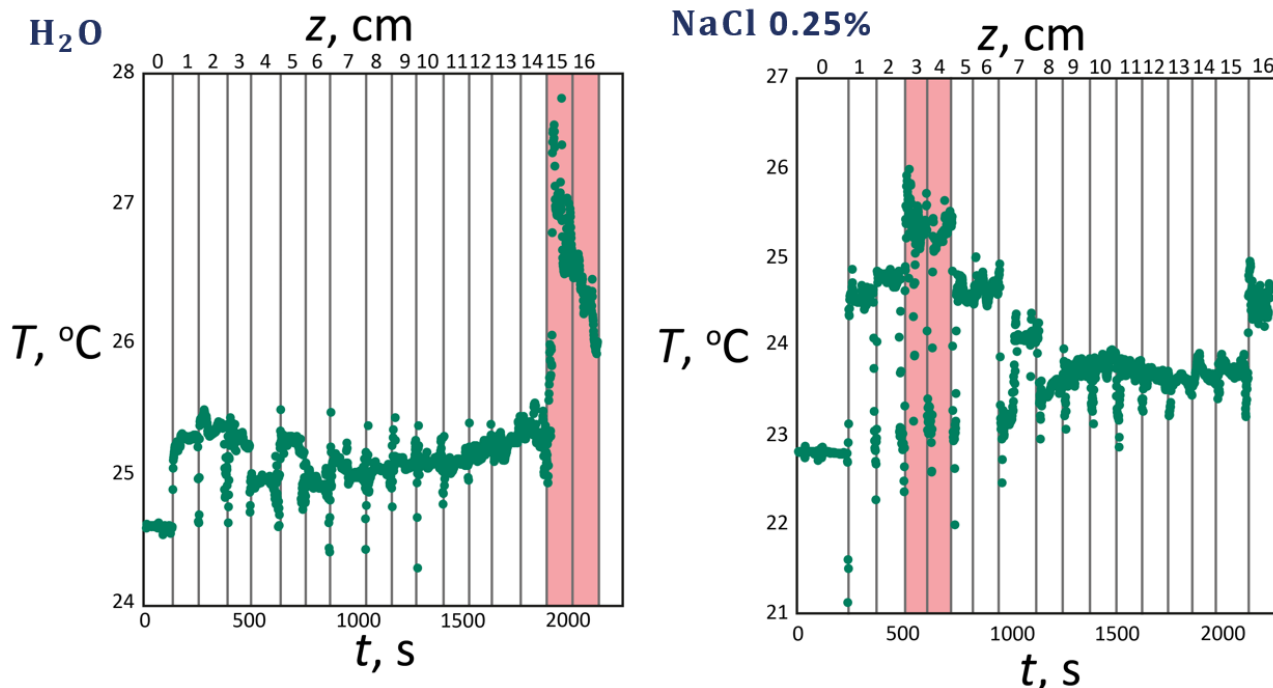


Рис. Распределение интенсивность кавитационных событий в сонохимическом реакторе вдоль вертикальной координаты с использованием термодатчиков.

1. Cravotto G., Cintas P. Power ultrasound in organic synthesis: moving cavitation chemistry from academia to innovative and large-scale applications // *Chemical Society Reviews*. 2006. Т. 35. №. 2. С. 180-19.

2. González-García J. et al. Sonochemical treatment of water polluted by chlorinated organocompounds. A review // *Water*. 2010. Т. 2. №. 1. С. 28-7.

3. Rokhina E. V., Lens P., Virkutyte J. Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art // *Trends in biotechnology*. 2009. Т. 27. №. 5. С. 298-30.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ В ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТА ФОРМИРОВАНИЯ ОБХОДНОГО СОСУДИСТОГО АНАСТОМОЗОСА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСУДИСТОЙ СЕТИ

Ю.О. Куянова¹, А.В. Дубовой², А.В. Бервицкий², Д.В. Паршин¹

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

²ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии», Новосибирск

e-mail: july9696@mail.ru

Формирование обходных анастомозов в сосудистой сети головного мозга – важный и актуальный метод лечения различных сосудистых патологий в современной клинической практике. Тем не менее, вопрос о том, нужно ли применять такой подход к лечению в случае каждого конкретного пациента, на сегодняшний день остается открытым, поскольку в некоторых случаях формирование анастомоза может не только оказаться неэффективным, но и вызвать послеоперационные осложнения. Кроме того, важной задачей является поиск оптимальных параметров соединения сосуда-донора и сосуда-реципиента.

Ранее в своей работе мы определили оптимальный угол формирования анастомоза [1]. Данное исследование посвящено проблеме оптимизации размещения донорского сосуда. Электрическая аналогия гемодинамической системы использовалась для моделирования сосудистой сети до и после формирования обходного анастомоза. Оптимальное место установки определяется с помощью методов роевого интеллекта, в частности, с помощью канонического метода роя частиц [2]. В ходе исследования также рассматривались различные наборы параметров канонического метода, с целью найти наиболее эффективный набор для рассматриваемой задачи.

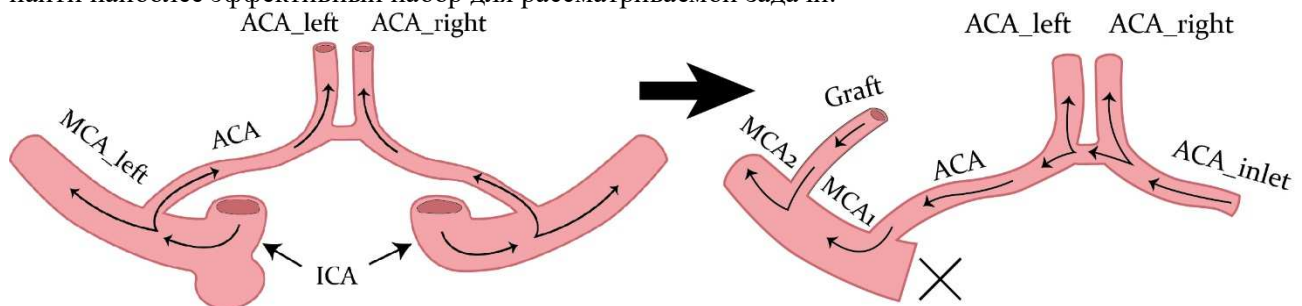


Рис. Сеть сосудов до операции с аневризмой (слева) и после операции с перекрытой аневризмой и сформированным анастомозом (справа).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 20-71-10034.

1. Yu. O. Kuyanov, S. S. Presnyakov, A. V. Dubovoy, A. P. Chupakhin, D. V. Parshin. Numerical study of the tee hydrodynamics in the model problem of optimizing the low-flow vascular bypass angle // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. V. 60, P. 1038-1045.

2. J. Kennedy, R. Eberhart. Particle swarm optimization // In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks IV. 1995. P. 1942–1948.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГИПЕРУПРУГИХ УЗЛОВЫХ СИЛ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОАПТАЦИИ СТВороК МОДЕЛИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА: ОБОЛОЧЕЧНАЯ ФОРМУЛИРОВКА ПРОТИВ МЕМБРАННОЙ

А.А. Легкий¹, В.Ю. Саламатова^{1,2}

¹Физтех-школа прикладной математики и информатики МФТИ(ГУ), Москва

²ИВМ РАН им. Г.И. Марчука, Москва

e-mail: al.liogky@yandex.ru

Характеристики коаптации (соприкосновения) имеют решающее значение при оценке физиологической пригодности реконструированных аортальных клапанов. Коаптацию створок клапана можно оценить, используя для моделирования оболочечную или мембранную формулировку. В данной работе мы впервые провели сравнение обоих подходов с точки зрения коаптационных характеристик. Наша численная модель тонких оболочек основана на сочетании метода гиперупругих узловых сил и конечных элементов без вращения. Оболочечная модель проверена на нескольких популярных тестах для тонких оболочек, учитывающих изгибную жёсткость. Относительная погрешность относительно референсных решений не превышает 1-2%. Мы применили наши численные оболочечные и мембранные формулировки для моделирования закрытия идеализированного аортального клапана с различными моделями гиперупругости и их модулями сдвига. Характеристики коаптации оказались чувствительны к учёту изгибной жёсткости и почти нечувствительными к выбору упругих потенциалов, из числа нами рассматриваемых.

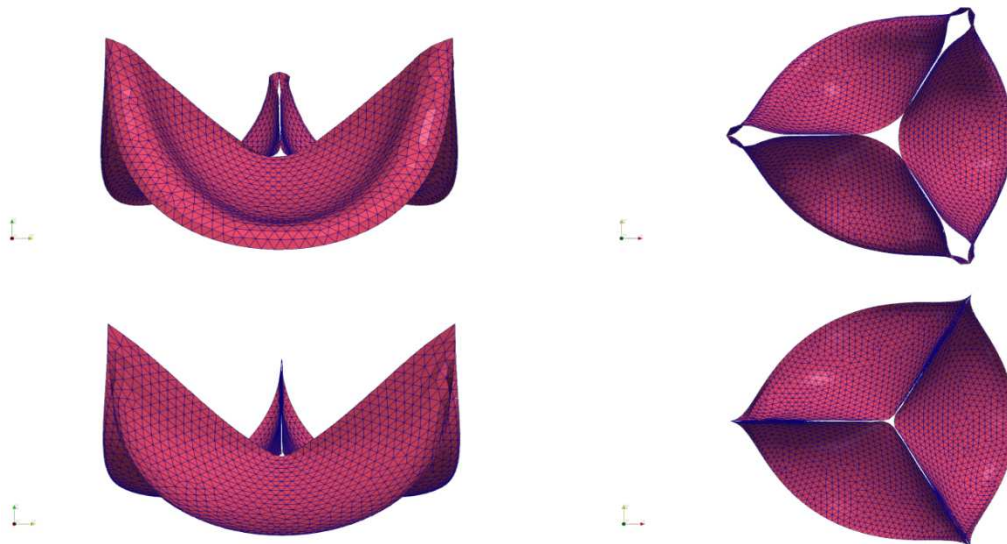


Рис. Результат моделирования закрытия модели аортального клапана для оболочечной (сверху) и мембранной (снизу) постановок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-71-10094) и Московского центра фундаментальной и прикладной математики в соответствии с соглашением 075-15-2019-1624 министерства образования и науки РФ.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ИНДЕНТОРОВ ДЛЯ NANOTEST 600, ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

А.С. Леднов, И.О. Харчевников, А.Л. Николаев
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону
e-mail: Alexlednow1@gmail.com

Инденитрование – испытание материала методом вдавливания в поверхность образца специального инструмента – индентора, применяемое, для таких структур, как тонкие плёнки, микроструктуры, различные биологические ткани (зубные, костные и даже глазные).

Несмотря на их высокую прочность они часто ломаются или выходят из строя, как в результате естественного износа, так и из-за неаккуратных действий оператора

Производством данных узкоспециализированных инденторов занимаются всего несколько фирм и стоимость их продукции высока. Поэтому процесс получения новых инденторов затруднен, и это негативно влияет на динамику исследовательской работы.

Авторами, был сконструирован специальный сферический индентор, состоящий из двух частей - сферы и держателя.

Сферы изготавливались отдельно из керамики и сапфира. Держатель был изготовлен для идеальной фиксации в индентометре NANOTEST 600 PLATFORM 3 (Micro Materials Ltd).

За основу корпуса держателя был взят вытасываемый на металлообрабатывающем станке корпус из нержавеющей стали X13. Были изготовлены корпуса для установки сферических наконечников различных диаметров: 200 мкм, 400 мкм, 500 мкм, 790 мкм, 1000 мкм, 5000 мкм, 6350 мкм.

Для установки сферы в держатель и максимально точного их позиционирования друг относительно друга, была разработана специальная методика. Сфера устанавливалась неподвижно в специальную форму из PLA, заливалась эпоксидной смолой и выдерживалась сутки для полной полимеризации. Получившуюся конструкцию устанавливали в шлифовальный станок MetaServ 250 (BUEHLER) и стачивали сферу на 1/20 диаметра. Далее, проводили совмещение усеченной сферы с держателем при помощи микрометрического винта. Связующим звеном между усеченной сферой и держателем был цианакрилат смешанный с ОСЧ ацетоном в объемной пропорции 1:1. Проверка качества соединения и позиционирования проводилась при помощи рентгеновского томографа Xradia 520 Versa (Carl Zeiss X-ray Microscopy, inc).

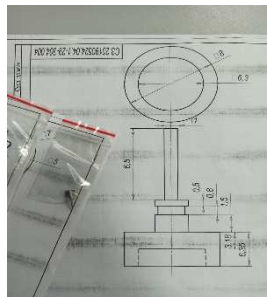


Рис. Чертёж корпуса держателя индентора и готовый образец.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Правительства РФ 14.Z50.31.0046. Все работы проведены в РЦКП ДГТУ (<https://nano.donstu.ru>).

1. DOI: 10.23947/itno.2018.1.110-114

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ АОРТЫ С ПАТОЛОГИЯМИ

А. Литовка¹, Д. Паришин¹, А. Карпенко^{1,2}

¹Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск

²НМИЦ им. ак. Е. Н. Мешалкина, Центр сосудистой и гибридной хирургии, Новосибирск

e-mail: ysm@imec.msu.ru

Аорта - самый крупный сосуд кровеносной системы человека, который играет важнейшую роль в процессе кровоснабжения всех органов и тканей. Любые поражения аорты приводят к тяжелым последствиям и даже к летальному исходу. При повреждении стенки и разрыве аорты вероятность летального исхода достигает 90% даже при экстренной госпитализации и хирургическом вмешательстве. Основная причина разрыва аорты – возникновение аневризмы, которая чаще всего возникает на брюшном отделе аорты. Риск разрыва при наличии аневризмы может усугубляться сопутствующими сердечно-сосудистыми заболеваниями - стенозом, атеросклерозом, которые вызывают патологические изменения стенок сосуда, приводящие к ухудшению упругих свойств тканей и постепенной его деградации.

Целью данной работы является экспериментальное изучение механических свойств тканей аорты с аневризмами и сопутствующими патологиями. Для этого использовались ткани аорты, иссеченные во время кардиохирургических операций в НМИЦ им. Мешалкина. В условиях, обеспечивающих наилучшее сохранение механических свойств этих сосудов, образцы аорты доставляются в лабораторию Института гидродинамики и науки им. М. А. Лаврентьева СО РАН, где проводятся эксперименты. Перед экспериментом полученную ткань разрезают на несколько образцов, по возможности обращая внимание на направление кровотока. После этого измеряются параметры образца, и он помещается в одноосную разрывную машину INSTRON 5944.

Полученные результаты были обработаны, для каждого эксперимента построены диаграммы деформация-напряжение. Такие данные, как предельное напряжение и деформация, а также модуль Юнга были определены для каждого типа патологии и статистически проанализированы.

Работа поддержана РФФ (№21-15-00091).

НЕНЬЮТОНОВСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ХЕЛЕ-ШОУ

О. А. Логвинов¹

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: oleglogvinov@mail.ru

Течениями в ячейке Хеле-Шоу называют течения жидкости между двумя параллельными пластинами на малом расстоянии друг от друга. Одно из применений подобных ячеек – использование их для аналогового моделирования фильтрационных течений в пористых средах. Особый интерес при этом представляет задача вытеснения вязкой жидкости, заполняющей ячейку Хеле-Шоу, другой – менее вязкой, подающейся в ячейку. Возникающая при таком вытеснении неустойчивость приводит к нарушению первоначально плоской формы межфазной границы (между нефтью и водой, например) и прорыву отдельных язычков вытесняющей жидкости (так называемых «вязких пальцев»).

Течения Хеле-Шоу ньютоновских (линейно-вязких) жидкостей к настоящему моменту хорошо изучены. Заметно больший интерес для прикладных задач представляют фильтрационные течения жидкостей с ярко выраженными неньютоновскими свойствами. В работе рассмотрены реологии четырёх принципиально отличающихся типов: обобщённая ньютоновская (степенная) реология Оствальда – де Виля, реология Бингама – Шведова с ненулевым пределом текучести, вязкоупругая реология Максвелла и нестационарная (тиксотропная) реология Мура. Экспериментальные данные показывают, что картины вытеснения в этих случаях получаются значительно богаче по сравнению с ньютоновскими жидкостями – возможно образование сильно разветвлённых, дендритных, «фрактальных» и трещиноватых структур (Рисунок).

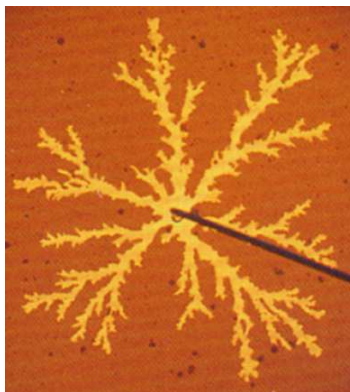


Рис. Вода вытесняет псевдопластическую суспензию (бentonитовая глина) с конечным пределом текучести.

В первой части работы на основе единого подхода, аналогичного подходу для линейно вязкой жидкости, выводятся осреднённые модели типа Хеле-Шоу для перечисленных реологий. Во второй части, в рамках полученных моделей рассматриваются задачи фронтального или радиального вытеснения. Отличительной особенностью исследования является отсутствие в системе стабилизирующих факторов: поверхностного натяжения и молекулярной диффузии. Характерный размер вязких пальцев при этом всё равно вырабатывается за счёт учёта вязких нормальных напряжений в динамическом условии на межфазной границе. Отметим, что этот учёт для неньютоновских жидкостей проводится впервые.

Результаты получаются разнообразные. Для жидкостей со степенной реологией удаётся объяснить происхождение дендритных структур. Для вязкоупругих жидкостей – образование трещин. Для тиксотропных жидкостей обнаружен эффект стабилизации фронта, отсутствующий в ньютоновском случае.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-07-00378.

1. Логвинов О. А. Вытеснение вязкой жидкости из кольцеобразной ячейки Хеле-Шоу со стоком в рамках модели Бринкмана. Изв. РАН. МЖГ. 2016. Т. №6. 57-64.

2. Auerbach D., Strobel G. Fingering patterns and their fractal dimensions. Chaos. Solutions. Fractals. 1995. Т. №5. 1765.

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ НАНОЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Д.С. Лоенко, М.А. Шеремет

Томский государственный университет, научно-исследовательская лаборатория моделирования процессов конвективного теплопереноса, Томск
e-mail: whiteink@bk.ru

За последние несколько лет многие фундаментальные исследования теплопереноса касались явления естественной конвекции в замкнутых пространствах из-за его важности и многочисленных технологических приложений в различных областях, таких как: энергоэффективное проектирование зданий, эксплуатация и безопасность ядерных реакторов, системы пассивного охлаждения электронных компонентов [1]. Интенсификация охлаждения электронных устройств напрямую зависит от рабочей жидкости в системе. Известно, что псевдопластические жидкости улучшают теплообмен за счет уменьшения вязкости при высокой скорости деформации. Также, улучшить теплообмен можно с помощью добавления наночастиц в базовую среду [2]. В настоящее время такой подход интенсификации естественно-конвективного теплообмена является очень популярным и перспективным. Однако, математическое описание динамики неньютоновской наножиждкости является сложным процессом.

Целью данного исследования является сравнение теоретических и экспериментальных моделей, используемых для описания эффективной вязкости и теплопроводности наножиждкости, в рамках задачи естественно-конвективного теплообмена в замкнутой полости с тепловыделяющим участком нижней стенки. Геометрическая область исследования изображена на рисунке 1. В качестве базовой неньютоновской среды использовалась смесь карбоксилметилцеллюлоза/вода (0.0%-0.3%), которая проявляет псевдопластический характер. В качестве материала наночастиц были проанализированы следующие вещества: Cu, Al₂O₃, CuO, TiO₂. Характеристики базовой смеси и материалов наночастиц представлены в [3].

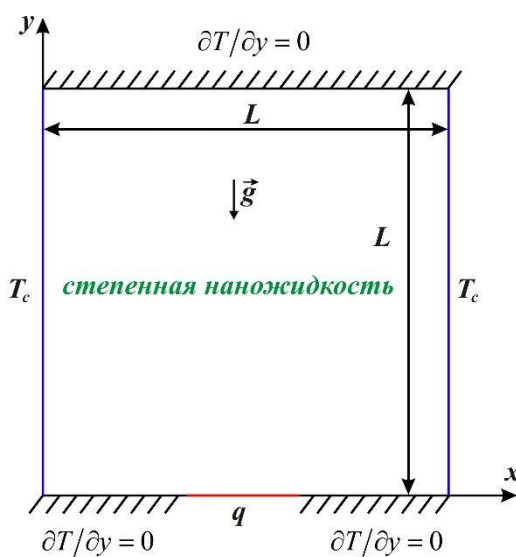


Рисунок 1. Область решения.

Математическая модель была сформулирована на основе законов сохранения массы, импульса и энергии в преобразованных безразмерных переменных «функция тока – завихренность». Неньютоновский характер течения жидкости описывался степенным законом Оствальда-де-Вилля. Численное моделирование было проведено с использованием метода конечных разностей на равномерной прямоугольной сетке [4]. Программный код был написан на языке C++ и протестирован на модельных задачах. Проанализировано влияние определяющих параметров на изолинии функции тока и температуры, а также на среднее число Нуссельта и среднюю температуру источника энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

1. Ouahouah A. et al. Natural convection within a non-uniformly heated cavity partly filled with a shear-thinning nanofluid and partly with air // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2021. Vol. 289. P. 104490.
2. Borode A.O., Ahmed N.A., Olubambi P.A. A review of heat transfer application of carbon-based nanofluid in heat exchangers // Nano-Structures & Nano-Objects. 2019. Vol. 20. 100394.
3. Maleki H. et al. Flow and heat transfer in non-Newtonian nanofluids over porous surfaces // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. Vol. 135. P. 1655–1666.
4. Loenko D.S., Shenoy A., Sheremet M.A. Effect of time-dependent wall temperature on natural convection of a non-Newtonian fluid in an enclosure // International Journal of Thermal Sciences. 2021. Vol.166.106973.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ГИБКОГО РОТОРА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ

К.А. Лонин, С.А. Малкин, В.А. Панов, В.Л. Патрушев, Д.В. Савчук, С.А. Соловьев

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: vapanov@okbm.nnov.ru

Одной из задач проектирования роторной системы на электромагнитном подвесе является определение и минимизация нагрузок, приходящих на опоры, определение прогибов и напряженного состояния её элементов. Особенности конструкции роторной системы приводят к необходимости разработки алгоритма связного решения задач управления движением и динамики ротора (см. рисунок). Приемлемых результатов моделирования в данном случае можно достичь с использованием комплекса современных программных средств и экспериментальных данных.

В докладе представлено использование технологии компьютерного моделирования вращения гибкого ротора с учетом системы управления электромагнитными подшипниками. При компьютерном моделировании роторной системы учтены особенности взаимодействия гибкого ротора с электромагнитными подшипниками и нагрузки, влияющие на его динамику. Рассмотрено возможное взаимодействие ротора со страховочными подшипниками в случае сейсмического воздействия. При этом определены параметры и особенности взаимодействия ротора со страховочными подшипниками.

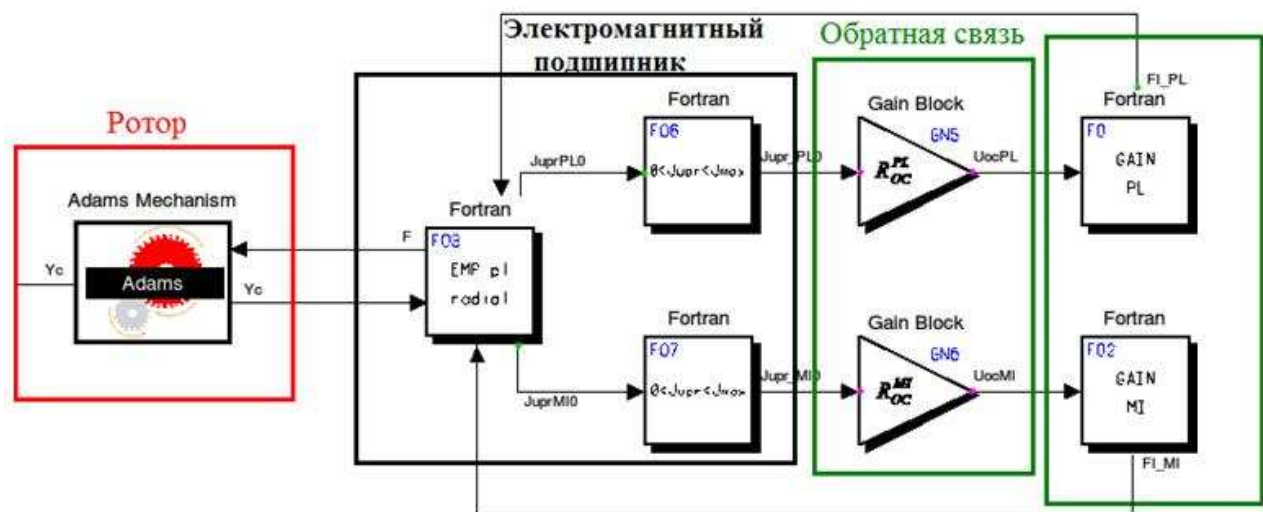


Рис. Алгоритм связного решения задач управления движением и динамики ротора.

1. Белов С.Е., Кодочигов Н.Г., Патрушев В.Л., Руин А.А., Соловьев С.А. Аналитические исследования динамики вращения ротора при отказе резервных подшипников // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4. С.63–64.

2. S. Malkin, D. Balandin. On stability of the electromagnetic suspension rotor in space of control parameters // Cybernetics and Physics. 2017. Vol. 6. N. 4. P.147–151.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ СХЕМ

А.И. Лопато, А.Г. Еременко

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

e-mail: lopato2008@mail.ru

В данной работе проводится математическое моделирование воспламенения газовой смеси в канале с торцевой стенкой, состоящей из двух эллиптических участков, разнесенных плоской стенкой [1]. Математическая модель основана на решении системы уравнений Эйлера, дополненной моделью кинетики горения водородно-кислородной смеси. Рассматривается применение как глобальной одностадийной модели с параметрами [Ошибка! Источник ссылки не найден.], так и детальной модели горения [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В начальный момент времени на торцевую стенку подается УВ. Расчеты проводятся с использованием неструктурированных треугольных сеток.

Для обеих моделей распространение УВ по области с отражателем приводит к формированию таких структур, как тройные точки, ножки Маха, контактные разрывы с вихрями C1 и C2, отраженные волны (см. Рисунок). Отражение волны сопровождается образованием струи, направленной от торца. Струя формирует грибовидные структуры и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (К), которые воспламеняются при достижении газодинамическими параметрами повышенных значений. В работе обсуждаются результаты, полученные с использованием двух моделей химической кинетики.

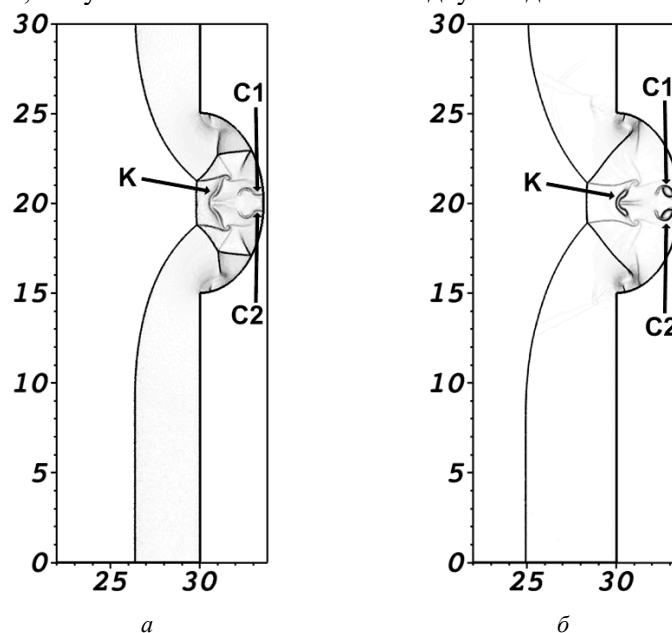


Рис. Пространственное распределение градиента плотности в момент времени 10 мкс. Значения координат указаны в миллиметрах.
a – одностадийная кинетика; *б* – детальная кинетика.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МК-244.2020.1).

1. Utkin P.S., Lopato A.I., Vasil'ev A.A. Mechanisms of detonation initiation in multi-focusing systems // Shock Waves. 2020. V. 30. P. 741–753.

2. Schultz E., Shepard J. Validation of detailed reaction mechanisms for detonation simulation // CalTech Explosions Dynamics Lab Report. 2000. FM99-5.

3. Petersen E.L., Hanson R.K. Reduced kinetics mechanisms for RAM accelerator combustion // Journal of Propulsion and Power. 1999. V. 15, № 4. P. 591–600.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОЙ ВЕЛИЧИНЫ

А.В. Лыкова¹, А.В. Ильиных¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: cem.lykova@gmail.com

Экспериментальные исследования механического поведения конструкционных материалов при малоциклового усталости и различных видах напряженно-деформированного состояния являются актуальными в связи с необходимостью анализа особенностей процессов неупругого деформирования и прогнозирования циклической долговечности [1]. Условия эксплуатации многих высоконагруженных деталей и элементов конструкций определяют необходимость планирования экспериментов на малоциклового усталость с учетом изменения во времени параметров циклического нагружения при сложном напряженно-деформированном состоянии.

Проведены испытания тонкостенных трубчатых образцов из алюминиевого сплава Д16Т на малоциклового усталость при растяжении-сжатии в условиях действия дополнительных касательных напряжений постоянной величины. При проведении экспериментальных исследований использовалась универсальная двухосевая сервогидравлическая испытательная система Instron 8850. Для регистрации осевых и сдвиговых деформаций в процессе испытания на малоциклового усталость использовался двухосевый высокотемпературный экстензометр Epsilon. Оценивалось влияние на долговечность дополнительных касательных напряжений постоянной величины, которые были выбраны по диаграмме деформирования цилиндрических образцов из сплава Д16Т на кручение.

В каждом испытании регистрировались петли гистерезиса в виде зависимостей нормальных и касательных напряжений от осевых и сдвиговых деформаций и отслеживались изменения максимальных и минимальных значений осевых деформаций в каждом цикле. По результатам испытаний построены зависимости угла поворота от числа циклов до разрушения.

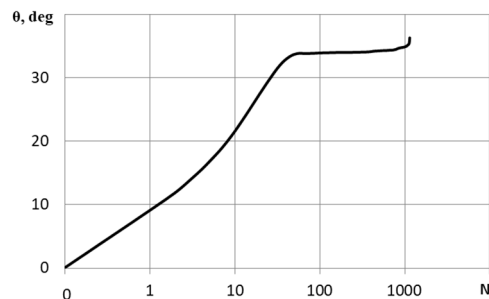


Рис. Зависимость угла поворота от числа циклов до разрушения в полулогарифмических координатах.

От цикла к циклу происходит значительное изменение сдвиговых деформаций в условиях сложного напряженного состояния при циклировании по нормальным напряжениям и наличии постоянной составляющей касательного напряжения. Из построенной зависимости циклической долговечности от уровня касательных напряжений постоянной величины наблюдается снижение долговечности сплава Д16Т при увеличении постоянной составляющей касательных напряжений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00555.

1. Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Лыкова А.В. Механическое поведение конструкционной стали ЭП517Ш при двухосной малоциклового усталости в условиях нормальных и повышенных температур // Вестник ПНИПУ. Механика. Год 2019. № . С. 77-86.

О ТРЁХМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ

Е.П. Магденко¹

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск
e-mail: magdenko_evgeniy@icm.krasn.ru

В работе исследуется нестационарная сопряжённая начально-краевая задача, описывающая трёхмерное двухслойное осесимметрическое движение двух несмешивающихся вязких теплопроводных жидкостей в горизонтальном вращающемся цилиндре с твёрдой внешней стенкой и общей недеформируемой поверхностью раздела. При этом массовые силы отсутствуют. Рассматривается поле скоростей типа Хименца. Граница раздела обладает поверхностным натяжением, которое линейно зависит от температуры. Учитывается полное энергетическое условие на границе раздела. Как было показано в работах [1] в условиях высоких тепловых нагрузок, когда вязкость и теплопроводность обычных жидкостей существенно уменьшаются, а также для некоторых специальных рабочих жидкостей эффекты, связанные с изменениями энергии границы раздела, могут оказывать значительное влияние на динамику поверхностных явлений. С математической точки зрения, возникающая начально-краевая задача является нелинейной и обратной относительно градиентов давлений вдоль оси цилиндра. Для решения задачи применяется модифицированный метод Галёркина. В результате исследовано влияние физических и геометрических параметров системы на интенсивность возникающих течений. Так на Рис. 1 показано влияние изменения отношения радиусов цилиндров на значения профилей скоростей.

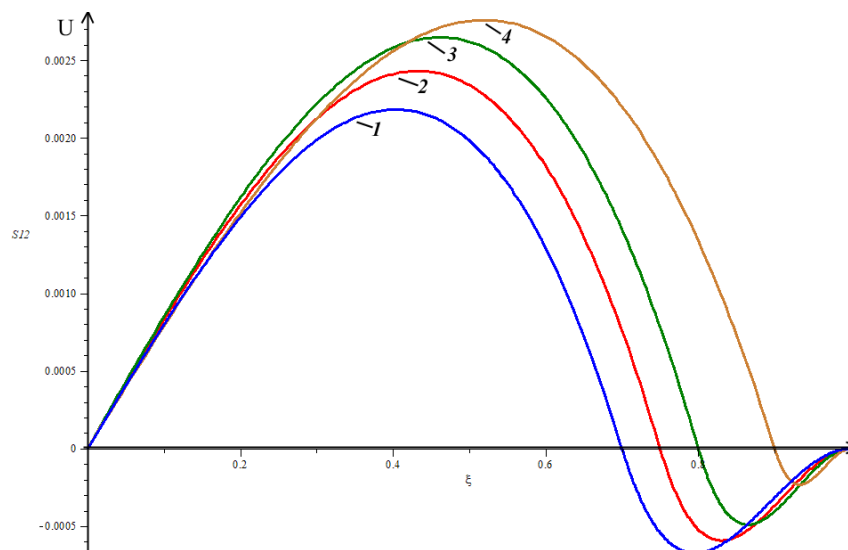


Рис. 1: Влияние параметра α на значения профилей скорости:
1 – $\alpha=0.75$, 2 – $\alpha=0.8$, 3 – $\alpha=0.9$, 4 – $\alpha=0.95$.

Стоит отметить, что полученное решение согласуется с результатами, полученными автором в работе [2], где рассматривалась стационарная задача о трёхмерном двухслойном осесимметрическом течении двух несмешивающихся вязких теплопроводных жидкостей в горизонтальном вращающемся цилиндре. Кроме того, получены точные решения сопряжённой задачи трёхмерной стационарной конвекции с учётом полного энергетического условия на поверхности раздела для ползущего течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-01-00234) и Красноярского математического центра, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2021-1384).

1. Torres F.E., Helborzheimer E. Temperature gradients and drag effects produced by convection of interfacial internal energy around bubbles // Phys. Fluids A. 1993. Т. 5. № 3. P. 537-549.

2. Magdenko E.P. Three-dimensional stationary flow of two immiscible liquids in a rotating cylinder with an isothermal interface // Journal "Interfacial Phenomena and Heat Transfer". 2020. Т. 8. № 4. P. 345-355.

ПРОЧНОСТЬ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН С ТЕТРАКИРАЛЬНЫМИ СОТАМИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ

А.В. Мазаев

Воронежский государственный технический университет, Международный научный центр по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук им. Заслуженного деятеля науки РФ, профессора Россихина Ю.А., Воронеж
e-mail: alexeymazaev@bk.ru

Тетракиральная структура представляет собой упорядоченно расположенные цилиндры по схеме квадратной решетки, которые соединяются друг с другом с помощью тангенциально прикрепленных ребер, где каждый из цилиндров содержит четыре прикрепленных ребра [1]. Экспериментально было показано, что данная структура обладает ауксетическим поведением в плоскости (отрицательным коэффициентом Пуассона) – увеличивается при растяжении и сужается при сжатии. Несмотря на особое внимание к ауксетикам в последнее время, теоретическую допустимость существования таких материалов впервые показал А.Э.Х. Ляв более 120 лет назад. Позднее к аналогичному выводу пришел Л.Д. Ландау. Исходя из известного выражения модуля сдвига для изотропного материала, следует вывод, что при стремлении коэффициента Пуассона к -1 значительно возрастает сопротивление сдвигу, что является одним из важных преимуществ ауксетиков [1].

В данной статье рассмотрены трехслойные композитные пластины с центральным слоем из тетракиральных сот. В условиях статического изгиба сэндвич-пластин при жестком закреплении и трехточечном изгибе определяются значения нагрузки, при которых максимальные напряжения в композитах приравниваются к условному пределу текучести. В процессе моделирования варьируется дискретизация (размер элементарных ячеек) и относительная плотность сотовых структур при постоянной толщине слоев сэндвич-пластин. Характеристики алюминиевого сплава Д16 выбраны в качестве свойств материала слоев. Для определения прочности используется численное моделирование с применением системы конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics, а также алгоритм конечно-элементного анализа на базе известных уравнений теории упругости. В условиях трехточечного изгиба композитные пластины с различной дискретизацией и равной относительной плотностью сотовых прослоек демонстрируют малое расхождение значений нагрузки на всем диапазоне значений относительной плотности в сравнении с изгибом при жестком закреплении. Также при изгибе с жестким закреплении и трехточечном изгибе композитные пластины демонстрируют подобное преимущество в прочности относительно сплошных пластин с равным объемом твердого тела.

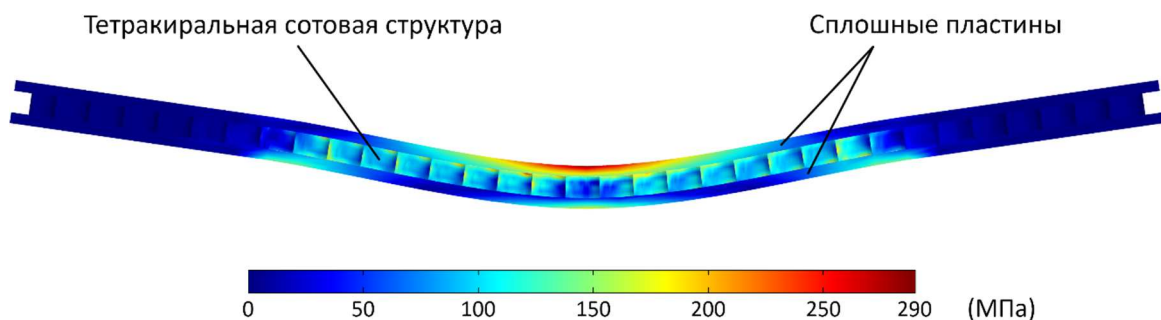


Рис. Напряженное состояние композитной пластины с тетракиральными сотами при трехточечном изгибе.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-38-90025 «Аспиранты».

I.Mazaev A.V., Ajeneza O., Shitikova M.V. Auxetics materials: classification, mechanical properties and applications // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 747. PaperID. 012008.

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С УМЕРЕННЫМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

В.Г. Луцик, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: mariia.makarova@gmail.com

Турбулентные пограничные слои, развивающиеся в присутствии положительного градиента давления (ПГД) имеют место во многих прикладных задачах, например, при обтекании затупленных тел, в диффузорах и в ряде других [1]. Существенным барьером для прогресса в понимании влияния градиента давления на пограничные слои является большое пространство параметров и неопределенность в отношении важности каждого из них. Основные параметры, оказывающие влияние на характеристики потоков с ПГД:

- предложенный Клаузером параметр градиента давления $\beta = (\delta^* \cdot dP/dx) / \tau_w$, где δ^* - толщина вытеснения, P - статическое давление, x - координата в направлении потока, τ_w - напряжение сдвига на стенке;

- число Рейнольдса трения $Re_\tau = \delta \cdot u^* / \nu$, где δ - толщина пограничного слоя, $u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ - скорость трения, ρ - плотность, а ν - кинематическая вязкость газа;

- параметр ускорения (торможения) $K = (\nu \cdot dU_1/dx) / U_1^2$, где U_1 - локальная скорость набегающего потока.

Целью настоящей работы является численное исследование турбулентного пограничного слоя с ПГД для экспериментально исследованного умеренного градиента давления [2] с расширением диапазона определяющих параметров β , K , Re_τ . В расчетах была использована трёхпараметрическая дифференциальная модель турбулентности [3].

Проведено сравнение результатов численного исследования влияния параметров ускорения (торможения) потока K и градиента давления β на профили скорости и интенсивности турбулентности в пограничном слое с умеренным положительным градиентом давления с известными экспериментальными данными. Показано, что влияние положительного градиента давления как в расчете, так и в эксперименте существенно в основной части пограничного слоя и слабое в пристеночной области. Получена расчетная зависимость относительной величины коэффициента трения от параметра градиента давления β для ряда значений параметра K , которая свидетельствует о возможности обобщения полученных результатов по параметру β (рис. 1).

Работа выполнена в рамках исследований, финансируемых Российским научным фондом (грант №19-79-10213).

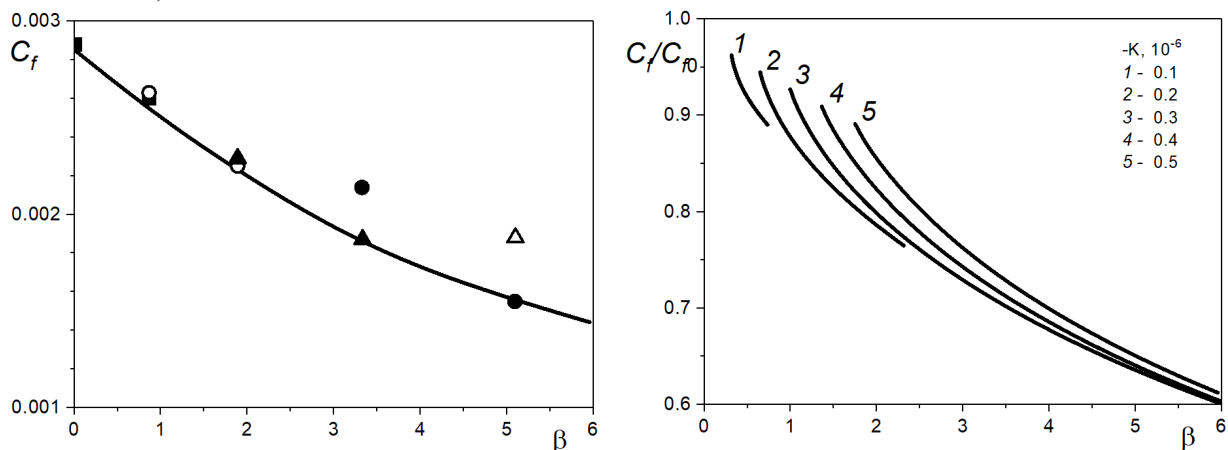


Рис. 1. а - Зависимость коэффициента трения C_f от параметра градиента давления β для числа Рейнольдса $Re_\tau = 1900$: линия – расчет, точки – эксперимент [2]; б - зависимость относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} от параметра градиента давления β для ряда значений параметра K .

1. Луцик В. Г., Макарова М. С., Решмин А. И. Интенсификация теплообмена при турбулентном течении в плоском и круглом безотрывных диффузорах // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 2. С. 483–495.

2. Monty J.P., Harun Z., Marusic I. A parametric study of adverse gradient turbulent boundary layers // Int. Journal of Heat and Fluid Flow, 2011. Vol. 32. P. 575-585.

3. Луцик В. Г., Макарова М. С., Решмин А. И. Применение трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности для решения задач течения и теплообмена в каналах переменного сечения: Часть 1 // Программная инженерия, 2021. Т. 12, № 1. С. 21–30.

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ПРЕДОТРЫВНЫМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

В.Г. Луцик, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: mariia.makarova@gmail.com

С использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности [1,2] проведено численное исследование турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления. Исследование проведено как для умеренного, так и для сильного градиента давления, соответствующего предотрывному пограничному слою.

При сильном градиенте давления в предотрывной области профиль скорости становится менее заполненным, приближаясь к линейному, коэффициент трения уменьшается, а энергия турбулентности и турбулентное напряжение сдвига существенно возрастают по сравнению со случаем безградиентного течения. Результаты численного исследования согласуются с известными экспериментальными данными [3].

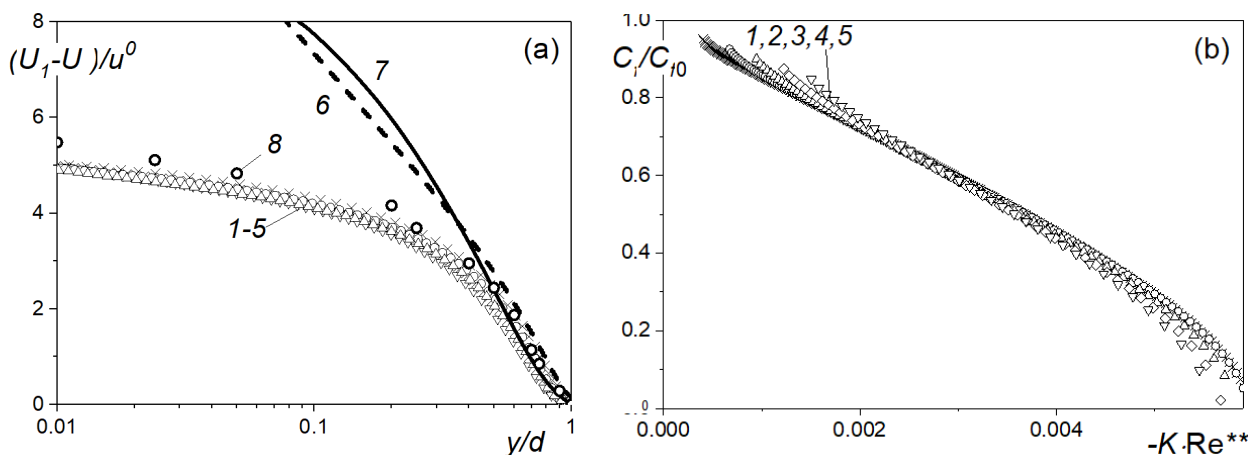


Рис. 1. Закон дефекта скорости в пограничном слое с положительным и нулевым градиентом давления (а), зависимость относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} от параметра $K \cdot Re^{**}$ (б): точки 1-5 – расчет для $K=-(0.3-1.1) \cdot 10^{-6}$, линия 6 – расчет для $K=0$; линия 7 – аппроксимационная зависимость (1); точки 8 – экспериментальные данные [3].

Для градиентного течения в широком диапазоне параметра ускорения получена экспериментально подтвержденная расчетная зависимость для закона дефекта скорости, в котором вместо динамической скорости используется некоторая характерная скорость, содержащая величину градиента давления (рис. 1, а):

$$\frac{u_1 - u}{u_0} = \Phi\left(\frac{y}{\delta}\right) = 9.6 \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^{2s} \quad (1)$$

Здесь u_0 – некоторая характерная скорость, p и s – константы.

Результаты расчета коэффициента трения в широком диапазоне параметра ускорения обобщаются зависимостью относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} от параметра отрыва пограничного слоя $K \cdot Re^{**}$ (рис. 1, б).

Работа выполнена в рамках исследований, финансируемых Российским научным фондом (грант №19-79-10213).

1. Луцик В. Г., Макарова М. С., Решмин А. И. Применение трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности для решения задач течения и теплообмена в каналах переменного сечения: Часть 1 // Программная инженерия, 2021. Т. 12, № 1. С. 21–30.

2. Луцик В. Г., Макарова М. С., Решмин А. И. Применение трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности для решения задач течения и теплообмена в каналах переменного сечения: Часть 2 // Программная инженерия, 2021. Т. 12, № 2. С. 89–106.

3. Simpson R.L., Strickland J.H., Barr P.W. Features of a separating turbulent boundary layer in the vicinity of separation // J. Fluid Mech., 1977. V. 79. Pt.3. P. 553-594.

ОБЗОР ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЖИМАЕМОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А.И. Леонтьев^{1,2}, В.Г. Лущик¹, М.С. Макарова¹, С.С. Попович¹

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

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: mariia.makarova@gmail.com

Приведены и проанализированы результаты экспериментальных, аналитических и численных исследований коэффициента восстановления температуры r и адиабатной температуры стенки T_{aw}^* , используемых в инженерных методиках расчета теплообмена для определения теплового потока в стенку при сверхзвуковых скоростях обтекания поверхностей энергоустановок и при исследовании эффекта энергоразделения газовых потоков [1]:

$$T_{aw}^* = T_1 + r \frac{u_1^2}{2c_p} = T_1 \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)$$

Здесь T_1 , u_1 , M – термодинамическая температура газа, скорость и число Маха набегающего потока, c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, γ – показатель адиабаты, $r = (T_{aw}^* - T_1) / (T_1^* - T_1)$ коэффициент восстановления температуры, T_1^* – температура торможения набегающего потока.

Рассмотрены как непроницаемые [2,3], так и проницаемые [4,5] поверхности, исследовано влияние на коэффициент восстановления температуры r таких факторов, как число Прандтля газа Pr , число Рейнольдса Re и Маха M набегающего потока, вдува (отсоса) газа через проницаемую стенку.

Для проницаемой стенки рассмотрены два способа определения коэффициента восстановления температуры, которые при докритическом вдуве дают близкие результаты. При критическом вдуве результаты, полученные двумя этими способами, отличаются. В первом случае для критического вдува получается единственное решение. Во втором случае при критическом вдуве всегда реализуется теплоизолированная стенка с температурой, равной температуре вдуваемого газа T_j . При этом определение коэффициента восстановления теряет смысл, т. к. при температуре стенки T_w , равной температуре вдуваемого газа T_j , можно получить любое значение величины коэффициента восстановления, задавая соответствующую величину температуры вдуваемого газа.

Работа выполнена в рамках исследований, финансируемых Российским научным фондом (грант №19-19-00234).

1. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ, 1997. Т. 35. №1. С. 157.

2. Лущик В.Г., Макарова М.С. Численное исследование влияния числа Прандтля на коэффициенты восстановления температуры и аналогии Рейнольдса в пограничном слое на пластине // ТВТ, 2016. Т.54. № 3. С. 401–407.

3. Popovich S.S., Egorov K.S., Vinogradov Yu.A. Experimental research of adiabatic wall temperature influenced by separated supersonic flow // Proc. 15th Int. Heat Transfer Conf. IHTC-15-8962, 2014. P. II.

4. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Коэффициент восстановления температуры в пограничном слое на проницаемой пластине // ТВТ, 2017. Т.55. № 2. С. 255–261.

5. Leontiev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. Distinctive features of heat transfer on a permeable surface in a laminar compressible gas flow at prandtl number $Pr < 1$ // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. Vol. 147, no. 118959. P. 1–7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭОЛОВОГО РЕЛЬЕФА НА ВЕТРОВЫЕ УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ

Е.А. Малиновская, О.Г. Чхетиани

Лаборатория геофизической гидродинамики Института физики атмосферы
им. А.М. Обухова РАН, Москва
e-mail: elen_am@inbox.ru

Пыль на поверхности движущихся крупных частиц размером 70-300 мкм (сальтаций и перекатывания) в результате взаимодействий отделяется при трении или ударе [1]. Размер генерируемых микрочастиц определяется углами падения сальтирующих и перекатывающих частиц, изменением направления ветра по отношению к грядам эоловых структур [2]. Исследуется влияние препятствия на движение воздушного потока со взвешенными в нем частицами над шероховатой поверхностью (при скоростях на высоте 1 м: 4,6; 5,07; 5,76; 6,22; 6,91 м/с). Размеры частиц задаются логнормальным законом. Используется Лагранжево-Эйлеровая модель, реализованная в открытом пакете OpenFoam. Рассмотрено влияние направления ветра по отношению к эоловой структуре, при изменении углов наклона ее поверхностей наветренного и подветренного склонов к горизонту, и, соответственно, их протяженностей.

Движение частиц над препятствием удлиняет зону рециркуляции, уменьшает высоту расположения локальной зоны увеличения турбулентной энергии, приближая ее к поверхности. Так как размеры и форма эоловой структуры, а также скорость воздушного потока влияют на протяженность и отдаленность от вершины зоны рециркуляции, то меняются траектории и скорости движения частиц разного размера над подветренным склоном. Чем больше удаленность траекторий движения частиц от центра зоны рециркуляции, тем больше дополнительный разгон и скорость их падения на поверхность. Вследствие возмущений, вызванных движениями частиц, в области за эоловой структурой возрастает турбулентная диффузия, что способствует интенсификации выноса пылевого аэрозоля за пределы слоя сальтации. Ускорение частиц приводит к усилению т.н. эффекта "разбрызгивания", а, следовательно, к увеличению числа откалываемых микрочастиц.

Само же изменение высоты эоловой структуры и ее ориентации по отношению к воздушному потоку влияет на интенсивность процессов перекатывания частиц по наветренному склону, что отражается в явлениях стирания мелкой фракции микрочастиц поверхности более крупных элементов. Соотношение типов перемещения частиц на наветренном и подветренном склонах, и, соответственно, процессов стирания и откалывания, определяется нелинейной связью углов наклона поверхности и скорости воздушного потока. Это влияет на вид функции распределения микрочастиц по размерам.

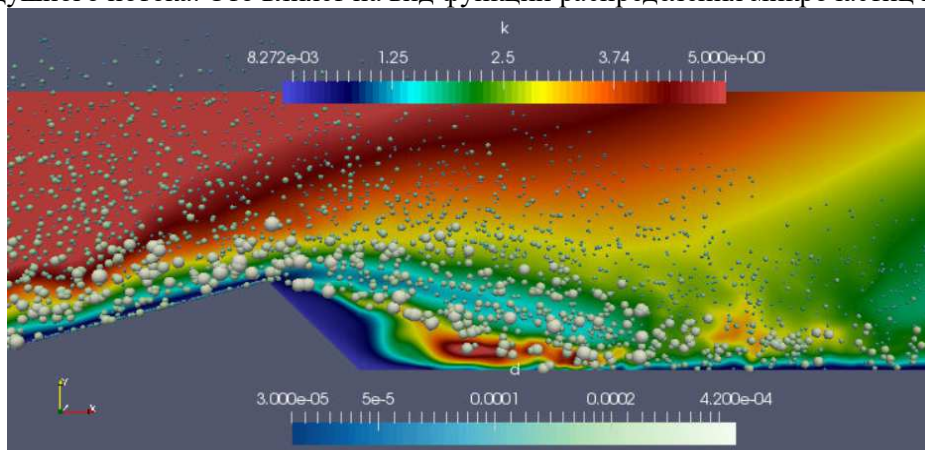


Рис. Изменение турбулентной энергии при движении частиц вблизи препятствия, на наветренном и подветренном склонах эоловой структуры.

Исследование выполнено при поддержке проекта Российского Научного Фонда №20-17-00214.

1. Liu Y., Fang H., Huang L., He G. Numerical simulation of the production of three-dimensional sediment dunes // *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31. no. 9. P. 096603.

2. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О. Влияние направления ветра на распределение эоловых микрочастиц по размерам // *Физика атмосферы и океана* [в печати].

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ МИКРОПОТОКОВ БЛИЗИ ПЕСЧАНОЙ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е.А.Малиновская¹, Д.Р.Малиновский²

¹Лаборатория геофизической гидродинамики Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

²ФГБОУ ВО СтГАУ, Ставрополь

e-mail: keup.kupupukp@yandex.ru

Поверхность, составленная из эоловых частиц под ветровым воздействием, является источником пыльного аэрозоля в атмосфере. Процесс ветрового выноса возможен при превышении критической или пороговой скорости ветра воздушного потока над подстилающей поверхностью. При этом неясна роль приповерхностной конвекции на процессы эмиссии микрочастиц [1, 2].

Принято предполагать, что песчаная поверхность содержит неровности к-типа, когда расстояния между частицами размерами 200 мкм больше их размера. Однако сама поверхность близка в большей степени по структуре к d-типу, когда расстояния между частицами существенно меньше их размера. Сопротивление поверхности, состоящей из частиц одинаково при малых расстояниях, меньших половины радиуса, и больших расстояниях, как для неровностей к-типа [4]. Это определяет сходство профилей для этих моделей поверхности, но для к-типа не учитываются процессы в порах, что для перегретой поверхности существенно.

Показано при численном моделировании микропроцессов в воздушных каналах, форма которого специально подготовлена средствами 3D-моделирования, между частицами на поверхности отмечалось увеличение вертикальной составляющей скорости воздушного потока на верхней границе (над поверхностью) [3].

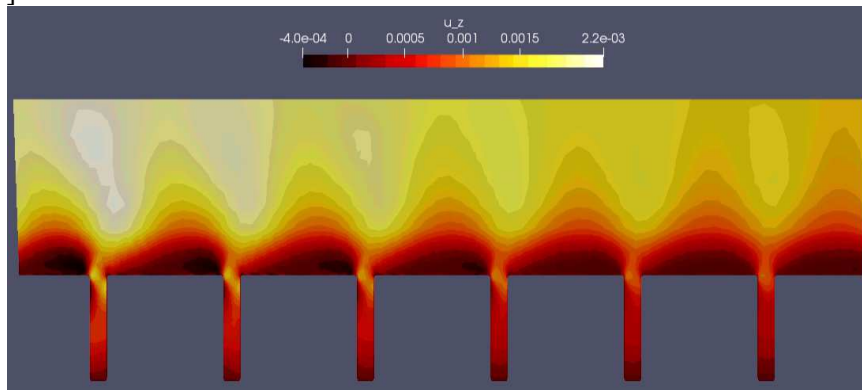


Рис. Численный эксперимент: движение тепловых потоков в каналах среды.

В новой постановке вычислительный эксперимент реализован для задачи движения потока над поверхностью с неровностями d-типа, составленной из частиц (200x200x200 мкм кубиков с различными расстояниями между ними), с использованием открытого пакета OPEN FOAM для ламинарной модели, учитывающей теплоперенос. Величина составляющей скорости U_z восходящего потока в верхней между частицами соответствует вертикальной скорости, полученной для канальной постановки задачи величине порядка 2 мм/с, что подтверждает наличие механизма микроконвекции у поверхности. Этот эффект отмечается при расстояниях между частицами, меньших половины их радиуса, что соответствует 50 мкм. Также между стенками частиц возникает вертикальный градиент давления и температур.

Разогретая в летние месяцы песчаная пористая среда создает особые условия для инициации восходящих тепловых микропотоков.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ 19-05-50110.

1. Houser C.A., Nickling W.G. The emission and vertical flux of particulate matter <10 μm from a disturbed clay-crusted surface // *Sedimentology*. 2001. Т. 48. № 2. С. 255-267.

2. Chkhetiani O.G. et al. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012. Т. 12. № 11. С. 5147.

3. Малиновская, Е.А., Чхетиани О.Г. Об условиях ветрового выноса частиц почвы // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020. Т. 13. № 2. С. 175-188.

4. Малиновская Е.А., Малиновский Д.Р. Исследование влияния теплового переноса в каналах песчаной почвы на возникновение вертикальных воздушных потоков у поверхности и ветровой вынос // *Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2020. Тезисы докладов (3–13 сентября 2020 г., Сочи, «Буревестник» МГУ)*. – М., 2020.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А.Р. Мецзякова^{1,2}, И.Г. Горячева^{1,2}

¹МФТИ (НИУ), Москва

²ИПМех РАН имени А.Ю. Ишлинского, Москва

e-mail: mif-almira@yandex.ru

Неоднородность структуры волокнистых композиционных материалов не позволяет использовать модели разрушения монолитных материалов для оценки прочности образцов из композита, поэтому существует необходимость развития новых моделей для описания процессов деформирования и разрушения композитов [1, 2]. Для оценки прочности композиционных материалов используются критерии, связанные с предельными или приведенными значениями компонент тензора напряжений [1].

Рассматривается задача об изнашивании бесконечным жёстким штампом с плоским основанием образца композита, состоящего из матрицы и волокон. Предполагается, что модули упругости волокна и матрицы близки друг к другу, а твердости их различны. В режиме установившегося изнашивания возникает равновесная форма поверхности и равновесное распределение контактного давления, которые определяются структурой композита [2]. Для заданного расположения жгутов волокон в упругом полупространстве произведен расчет распределения контактного давления и внутренних напряжений в каждой точке упругого полупространства. Результаты показывают, что при постоянном радиусе жгутов волокон с уменьшением расстояния между центрами их сечений на поверхности полупространства наибольшее значение максимального касательного напряжения внутри композита смещается ближе к поверхности, и уменьшается разница между максимальными касательными напряжениями, возникающими в волокне и матрице на фиксированной глубине. Полученное распределение внутренних напряжений в композитном материале используется для анализа характера разрушения композита в рамках выбранного критерия его разрушения.

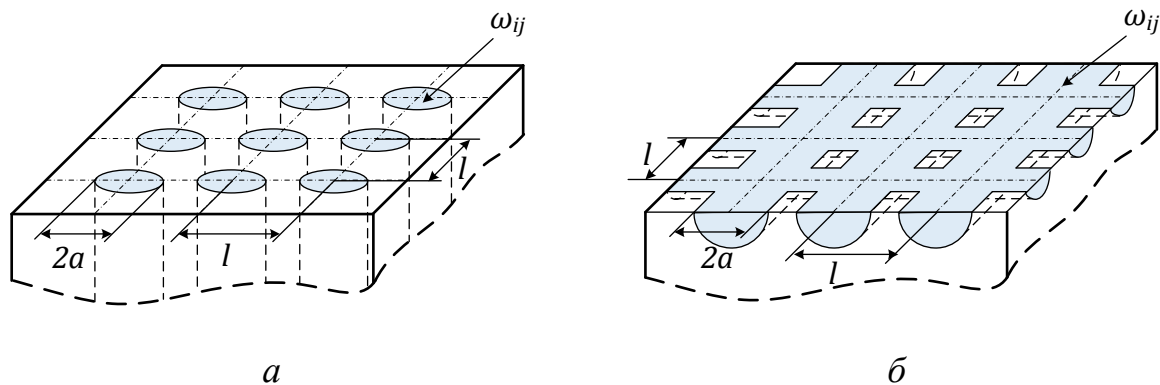


Рис. Схема расположения волокон или жгутов в композите, когда *a* – волокна (или жгуты волокон) направлены перпендикулярно к поверхности трения, *б* – волокна (или жгуты волокон) направлены параллельно к поверхности трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ: №19-19-00548.

1. Орешко Е.И. и др. Обзор критериев прочности материалов // Труды ВИАМ. 2019. Vol. 81, № 9. P. 108–126.

2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия // Москва: Наука. 2001. С. 480.

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ И ПОВЕРХНОСТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ОБОГРЕВАЕМОЙ КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

С.А. Михайленко, М.А. Шеремет

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
e-mail: stepanmihaylenko@gmail.com

Исследование конвективного теплопереноса в условиях теплообмена излучением играет важную роль при решении множества инженерных задач, например, при проектировании роторных теплообменников [1], солнечных концентраторов [2], систем охлаждения электронной аппаратуры [3].

Целью настоящей работы является математическое моделирование конвективно-радиационного теплопереноса во вращающейся дифференциально-обогреваемой кубической полости, заполненной диатермичной средой.

Кубическая полость (рис 1) заполнена ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Система вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ξ_0 вокруг оси \bar{x} , проходящей через центр области решения. Левая стенка нагревается при температуре T_h , правая охлаждается при температуре T_c , остальные стенки являются адиабатическими. Среда считается прозрачной для излучения, внутренние поверхности стенок являются серыми излучателями и отражателями энергии теплового излучения.

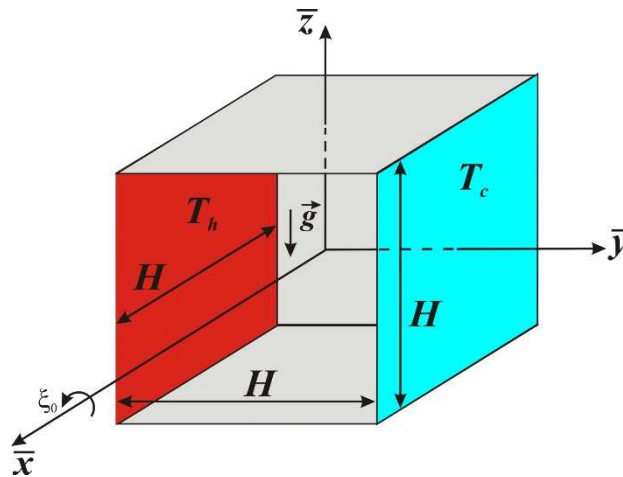


Рис. 1. Область решения.

Система дифференциальных уравнений Обербека–Буссинеска записана в безразмерном виде с использованием переменных «векторный потенциал – вектор завихренности». Сформулированная краевая задача решена методом конечных разностей на равномерной сетке.

Исследовано влияние вращения и теплового излучения на гидродинамику и теплоперенос. Отдельно проанализирован вклад переносной силы инерции в формирование полей скорости и температуры. Проведено сравнение с результатами двумерной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашение № 20-31-90081).

1. Huang S.-C., Wang C.-C., Liu, Y.-H. Heat transfer measurement in a rotating cooling channel with staggered and inline pin-fin arrays using liquid crystal and stroboscopy // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. № 115. P. 364–376.

2. Wu W., Amsbeck L., Buck R., Waibel N., Langner P., Pitz-Paal R. On the influence of rotation on thermal convection in a rotating cavity for solar receiver applications // Applied Thermal Engineering. 2014. № 70(1). P. 694–704.

3. Banerjee S., Mukhopadhyay A., Sen S., Ganguly R. Thermomagnetic Convection in Square and Shallow Enclosures for Electronics Cooling // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2009. № 55(10). P. 931–951.

ОБОБЩЕННАЯ ПРОИЗВОДНАЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УЧЕТА МИКРОСТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ

А.В. Мишин^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича, Новосибирск

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск
e-mail: aleksey-mishin94@mail.ru

Одним из принципиальных нерешенных вопросов аналитического моделирования гетерогенных сред является учет микроструктуры системы (геометрии и физических свойств фаз). Введенной математической концепцией, направленной отобразить микроструктуру гетерогенной системы, выступает производная в обобщенном смысле [1]. Соответствующая производная содержит обычную и сингулярную составляющие. Сингулярная часть выражает разрывы поля на поверхности, что является естественным следствием анализа гетерогенной среды, характеризуемой развитой системой внутренних границ, разделяющих фазы с разными физическими свойствами. Проведение осреднения результата действия на поле производной в обобщенном смысле приводит к пространственной теореме осреднения в рамках теории смесей [2]. Описание гетерогенной среды осуществляется в рамках метода условных моментов [3]. Функционал данного подхода базируется на формализме функций Грина, условном осреднении и преобразовании Фурье. Методом условных моментов удается получить осредненные уравнения с эффективными коэффициентами упругости для среды в целом и для каждой фазы отдельно. Функция Грина, определяемая действующим оператором, отображает отклик поля в среде на приложенное воздействие. Исходя из этого ее роль в анализе характера распространения исследуемого поля по неоднородной системе является ключевой. В результате модификации операторов в исходной модели линейной теории упругости функция Грина характеризует микроструктурные особенности системы. Используя преобразованный в работе метод условных моментов, получены интегралы, содержащие осредненную функцию Грина и корреляционную функцию геометрии структуры. На основании этих членов микроструктура системы интегрально учтена (в параметре γ) во входящих в осредненные уравнения эффективных коэффициентах упругости:

$$K^* = c_1 K_1 + c_2 K_2 - \frac{c_1 c_2 (K_1 - K_2)^2}{c_1 K_2 + c_2 K_1 + K^* \frac{1-\gamma}{\gamma} + \frac{4}{3\gamma} \mu^*},$$
$$\mu^* = c_1 \mu_1 + c_2 \mu_2 - \frac{c_1 c_2 (\mu_1 - \mu_2)^2}{c_1 \mu_2 + c_2 \mu_1 + \frac{\mu^* \left(\left(\frac{5}{2} - \gamma \right) K^* + 2 \left(\frac{5}{3} - \gamma \right) \mu^* \right)}{K^* + 2\mu^*}}.$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 21-19-00733.

1. Шварц Л. Математические методы для физических наук / Пер. с франц. М.: Мир, 1965.
2. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред // М. Наука, 1978.
3. Хорошун Л.П. О математической модели неоднородного деформирования композитов // Прикладная механика. 1996. №5 Том 32. С. 22-29.

ВОЛНОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

И.Н. Солдатов^{1,2}, З.П. Мишустова¹

¹Радиофизический факультет ННГУ имени Н.И. Лобачевского, Н. Новгород

²Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

e-mail: igorsldtv@yandex.ru

Исследуются свойства инерционных возмущений в закрученной струе вязкой жидкости как часть проблемы гидродинамической устойчивости. В невозмущенном состоянии в струе наблюдается линейное распределение азимутальной скорости и постоянная аксиальная скорость. Вне области центрального вихревого течения закрученной жидкости движение остального объема жидкости потенциальное. Жидкость во внешней области считается идеальной и имеет плотность, отличную от плотности вязкой жидкости струи (рисунок). Жидкости предполагаются неэмульгирующими и несмешивающимися между собой. Сколь важна проблема устойчивости вихревых течений хорошо известно; менее известно, что еще Кельвин рассматривал инфинитезимальные возмущения цилиндрической поверхности колоннообразного вихря и показал, что этот вихрь без осевого течения и без учета вязкости нейтрально устойчив. Неустойчивость возникает, когда есть достаточно быстрое осевое течение в ядре, что было показано в работах Chandrasekhar S. и Krishnamoorthy V. Позднее Moore D.W. и Saffman P.G., Ueberoi M.S. et al., Lessen M. et al., Loiscleux et al. выполнили более детальные исследования неустойчивости. Влияние вязкости жидкости во внутренней области вихря на устойчивость, за исключением очень частных случаев, ранее не рассматривалось. Движение жидкости ядра описывается уравнением Навье-Стокса (удобнее вести рассмотрение в неинерциальной системе отсчета, так что в уравнении движения появляются два члена, связанные с действием кориолисовой и центробежной сил):

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + 2\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega} + \frac{1}{2} \nabla [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}]^2, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

где μ – динамическая вязкость, $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость закрученного течения, остальные обозначения стандартны. Рассматривая малые возмущения, мы переходим к линеаризованной задаче.

Показано, рассматриваемая гидродинамическая задача допускает точные решения, поле скоростей в центральной области представляется в виде суперпозиции трех парциальных волн, во внешней области используется известное решение. Получено и исследовано дисперсионное уравнение в пределе коротких и длинных волн. Анализ дисперсионного уравнения в промежуточной области достаточно сложен, но, и это является одним из основных результатов работы, можно получить оценки параметров, при которых стационарное движение жидкости является устойчивым, без детального исследования дисперсионного уравнения.

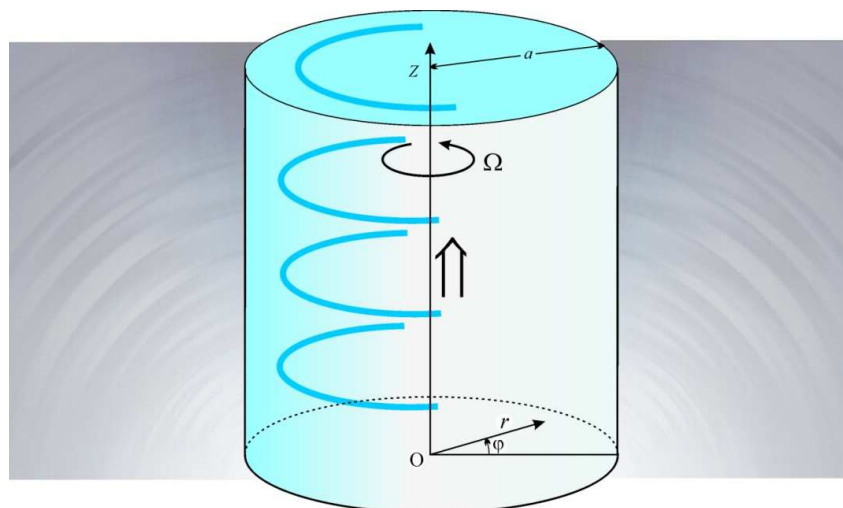


Рис. Закрученная невозмущенная струя вязкой жидкости, окруженная идеальной жидкостью с вращением по закону потенциального вихря и с нулевой аксиальной скоростью.

1. Soldatov I.N., Klyueva N.V. Effects of viscosity on inertial waves in swirling jets // Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows. 2020. AIP 2211. 030007. P. 1–6.

СТАТИСТИЧЕСКИ-ДОСТОВЕРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА МОДЕЛИ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

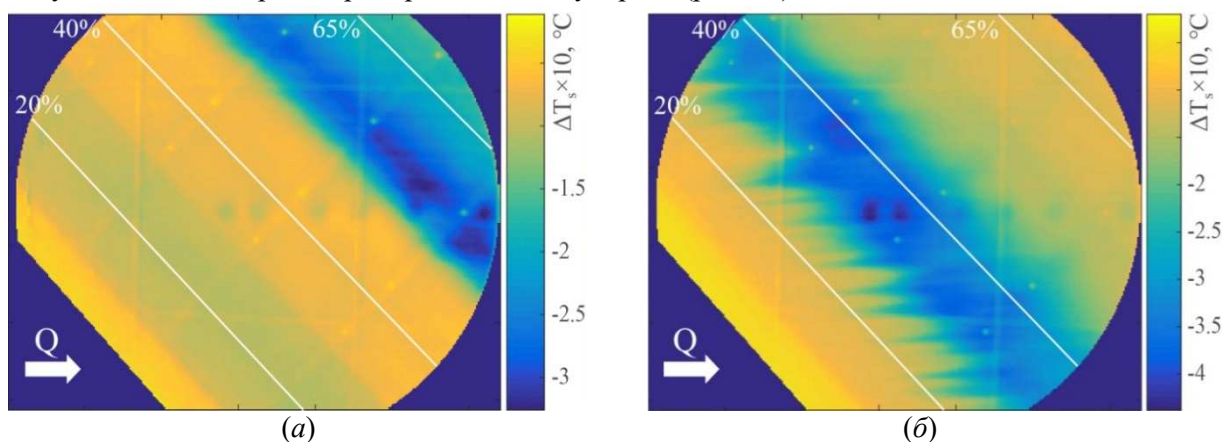
В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Д.А. Мищенко

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
e-mail: D.A.Mischenko@itam.nsc.ru

Работа посвящена созданию пополняемой базы надежных экспериментальных данных пригодных для верификации современных программных пакетов предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в пограничных слоях на стреловидных крыльях. В создаваемой базе будет содержаться исчерпывающая информация об условиях проведенных экспериментов: параметры экспериментальной модели; скорость и степень турбулентности набегающего потока; параметры среднего течения около модели; а также информация о положениях ЛТП в широком диапазоне параметров задачи. В данный момент в базу вносятся результаты новых систематических экспериментов, проведенных с использованием оригинальной статистически-достоверной тепловизионной методики регистрации положения ЛТП.

Эксперименты проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН с использованием высокоточной экспериментальной модели стреловидного крыла (профиль НАСА 67 1-215 (модифицированный), хорда 700 мм, угол скольжения 45°). Основные измерения положения ЛТП проведены на двух сторонах модели для трех углов атаки крыла $\alpha = -5, 0$ и $+3$ град. в диапазоне скоростей на входе рабочей части трубы Q от 15 до 50 м/с. Исследования проведены для трех степеней турбулентности потока $\varepsilon \approx 0,1; 0,55$ и $0,75\%$. Характеристики среднего течения у рабочих поверхностей модели были тщательно задокументированы с помощью дренажных и термоанемометрических измерений для каждого установленного угла атаки.

Положение ЛТП фиксировалось за счет применения высокоточной тепловизионной камеры FLIR SC7300. Перед проведением тепловизионной съемки рабочая поверхность модели равномерно нагревалась примерно на 6°C относительно комнатной температуры, затем производился запуск Т-324 с одновременной записью видеоизображения распределения температур на поверхности модели (термограммы) с частотой 50 Гц. В результате, полученные термограммы включали все стадии формирования течения на рабочей поверхности модели. Компьютерная обработка, основанная на анализе производных по времени от пространственных распределений логарифмов температур поверхности, позволяет получить статистически-достоверные координаты начала, конца и протяженности ЛТП для каждого из исследованных режимов. В проведенных экспериментах зафиксировано три основных сценария ЛТП, вызванных: (1) неустойчивостью Толлмина-Шлихтинга (ТШ) (рис. 1а), (2) модами неустойчивости поперечного течения (ПТ), а также (3) сценарий, в котором обе неустойчивости играют примерно одинаковую роль (рис. 1б).



Визуализация ЛТП на «нижней» стороне модели за счет отображения временного изменения температуры поверхности модели ΔT_s (за 2 с.) в случае, когда ЛТП вызван усилением: (а) волн ТШ и (б) мод неустойчивостей ТШ и ПТ одновременно: $\alpha = +3^\circ$, $\varepsilon \approx 0.75\%$, $Q = 15$ м/с (а), $Q = 33$ м/с (б)

Работа по созданию базы выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А19-119051590050-2).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ

М.Н. Муллахметов, А.В. Ильиных

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь
e-mail: m.mullahmetov59@gmail.com, ilinih@yandex.ru

Представлены результаты разработки модификации предложенного ранее программного комплекса, позволяющего получать модели структур зернистых композитов [1]. Разработанная модификация позволяет выделить в явном виде межзеренные границы в структуре (см. рис.1, а). В алгоритм генерации микроструктур заложен ряд управляющих параметров, таких как: форма и размер зерна, количество зерен, ориентация зерен, толщина межзеренной границы, прочностные характеристики зерен и межзеренных границ. Полученные микроструктуры использовались при численном моделировании процессов деформирования в условиях одноосного растяжения при жестком нагружении с учетом процессов накопления повреждений. В ходе работы выявлены зависимости характера разрушения от соотношения прочностных характеристик зерен и межзеренных границ. Получены следующие варианты развития разрушений: интеркристаллитный, характеризующийся разрушением межзеренных границ, транскристаллитный, характеризующийся разрушением зерен, и смешанный, сочетающий в себе оба предыдущих. Проведен анализ влияния прочностных характеристик зерен и межзеренных границ на закономерности деформирования на закритической стадии.

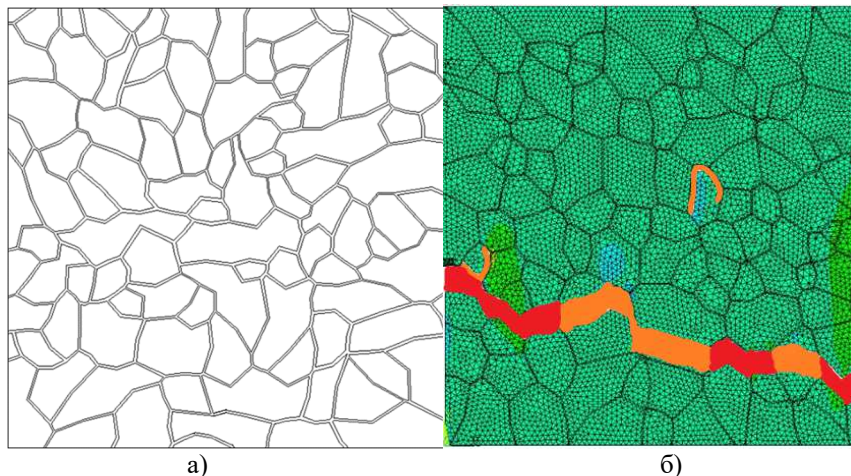


Рис.1. а) модель структуры зернистого композита; б) результаты численного моделирования (красный цвет - интеркристаллитное разрушение, оранжевый - транскристаллитное).

1. Ильиных А.В. Численное моделирование процессов структурного разрушения зернистых композитов с изотропными элементами структуры // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2011 – № 2 (23). – С. 101–106.

2. Феклистова Е.В., Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Изучение влияния параметров численного моделирования на решения краевых задач о разрушении тел с трещиноподобными дефектами// XXXI международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). Сборник трудов конференции. - 2020. - С. 872-875

3. Муллахметов М.Н., Ильиных А.В. Численное моделирование процесса разрушения пучков параллельных волокон // Master's journal. – 2020. – № 1. – С. 9-26.

ДИНАМИКА ВОЛЧКА ТИП-ТОП НА ПЛОСКОСТИ С ТРЕНИЕМ

М.А. Муницына

Московский физико-технический институт, Долгопрудный
e-mail: munitsyna@gmail.com

Рассматривается задача о движении неоднородного динамически симметричного шара на горизонтальной плоскости. Предполагается, что центр масс шара не совпадает с его геометрическим центром, но лежит на оси динамической симметрии. Считается также, что в точке контакта с плоскостью на шар действует сила и/или момент трения.

Хорошо известный качественный анализ динамики шара [1], основанный на методе обобщенных диаграмм Смейла [2, 3], дополняется [4, 5] приближенными уравнениями движения, описывающими динамику шара в каждой из возможных областей движения (рис.) в случаях классического сухого или вязкого трения, а также в случае их поликомпонентных обобщений.

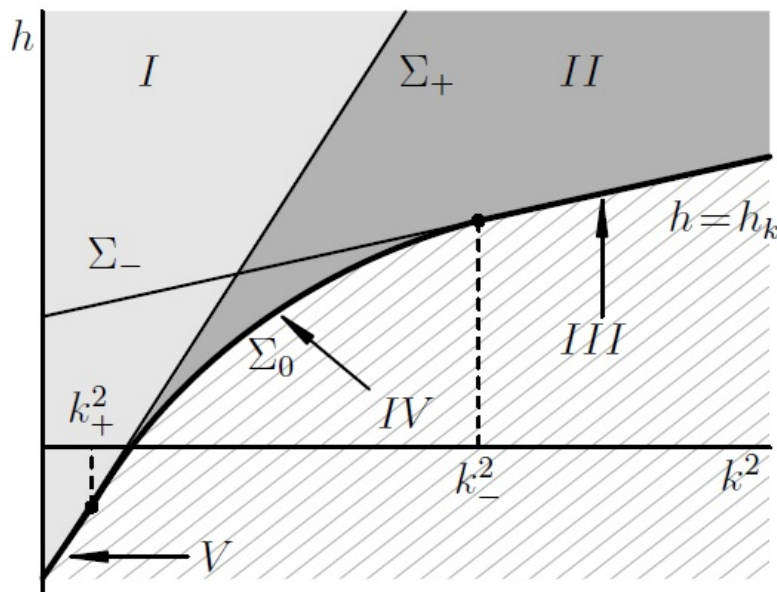


Рис. Одна из обобщенных диаграмм Смейла: h, k – значения полной энергии и величины Джеллета, Σ_{\pm}, Σ_0 – соответствующие стационарным движениям инвариантные множества.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-01-00583 и Программы №29 Президиума РАН.

1. Карапетян А.В. Глобальный качественный анализ динамики китайского волчка (тип-топ) // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2008. № 3. С. 33–41.

2. Карапетян А.В. Качественный анализ динамики диссипативных систем с симметрией на основе метода обобщенных диаграмм Смейла // Современные проблемы математики и механики. 2009. Том 2. Механика. Выпуск 2. М.: Изд-во МГУ. С. 192–200.

3. Карапетян А.В. Обобщенные диаграммы Смейла и их применение к задачам динамикисистем с трением // Аналитическая механика, устойчивость и управление: Тр. 10-й Междунар. Четаевской конф. Т. 1. Секц. 1. Аналитическая механика. Казань, 2012. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. С. 247–258.

4. Муницына М.А. Переходные процессы в динамике волчка тип-топ // ПММ. 2020. Т. 84. Вып. 4. С. 433-441.

5. Карапетян А.В., Муницына М.А. Динамика волчка тип-топ при вязком трении // Труды МФТИ. 2021. Т. 13. № 1. С. 114-121.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОСТА ПРИ УЧЕТЕ УГЛУБЛЕНИЙ ПОД СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ В СФЕРИЧЕСКОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКЕ

А.А. Адамов¹, А.А. Каменских², Ю.О. Носов²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: ura.4132@yandex.ru

В рамках работы рассмотрена одна из актуальных задач мостостроения, связанная с анализом влияния геометрической конфигурации полимерного слоя скольжения сферической опорной части с углублениями под смазочный материал [1] на работу конструкции. Рассмотрено два варианта углублений под смазочный материал в сферическом слое скольжения опорной части мостового строения (рис. 1): кольцевые канавки и сферические лунки.

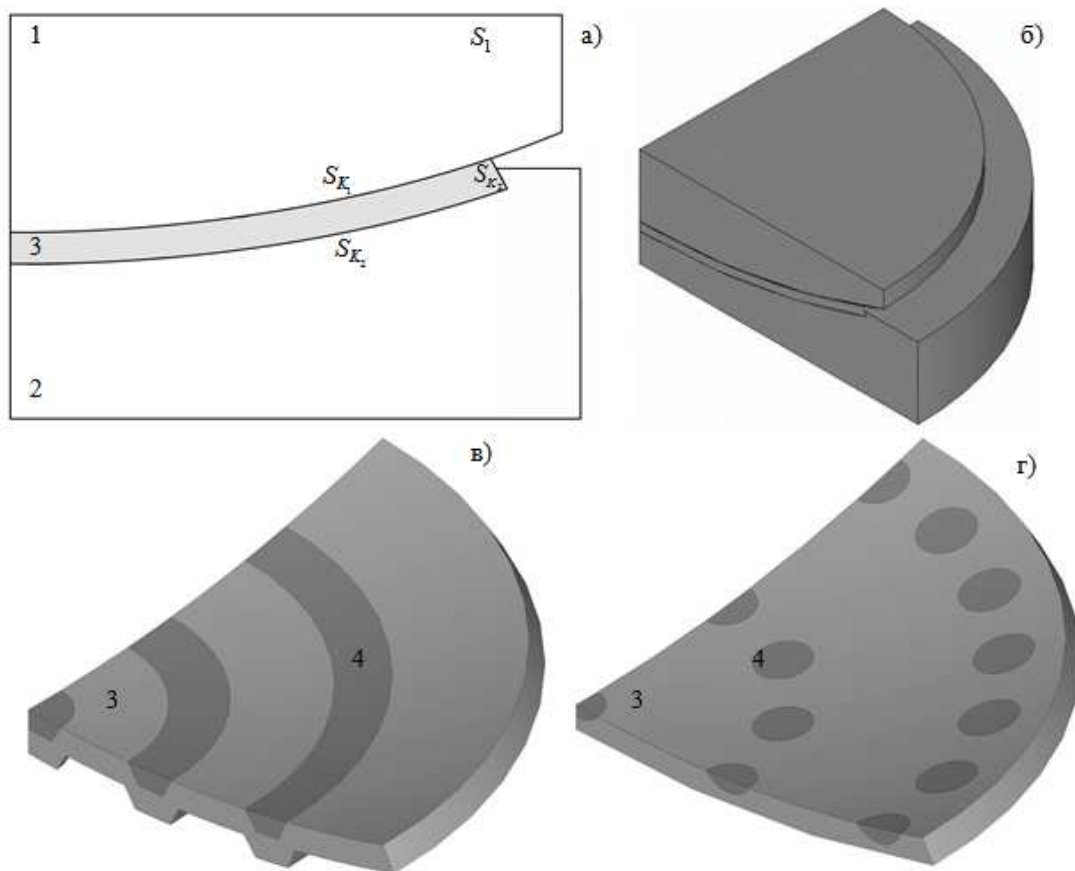


Рис. 1. Сферическая опорная часть: а) упрощенная расчетная схема; б) упрощенная 3D модель; в) прослойка с канавками под смазку; г) прослойка со сферическими углублениями под смазку.

Задача рассматривается в рамках общей математической постановки контактного взаимодействия двух упругих тел через упругопластическую прослойку [2]. Анализируется влияние геометрической конфигурации слоя скольжения опорной части и фрикционных свойств материала слоя скольжения и смазки на работу конструкции в целом. Моделирование выполнено в трехмерной постановке для четверти конструкции. Расчетные схемы деформируются вертикальной нагрузкой 1000 кН.

1. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials // PNRPU Mechanics Bulletin. 2020. № 4. P. 15-26.

2. Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 1. С 54-61.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЛПОВОГО ВЫНОСА ПРИМЕСИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОТОКА И ДНА В ПРОЦЕССЕ ТЕЧЕНИЯ РЕКИ

Я.Н. Паршакова¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
parshakova@icmm.ru

В процессе химического производства, в том числе минеральных удобрений, возникает необходимость утилизации избыточных высокоминерализованных рассолов. Основным средством утилизации рассолов является сброс в поверхностные водные объекты или подземные водоносные горизонты. При этом при распространении насыщенного рассола в поверхностных водных объектах происходит аккумуляция солей вблизи речного дна [1], и как следствие в придонных грунтовых водах. Накопленные примеси в водоносном слое дна реки, безопасные при малых и средних расходах, с увеличением интенсивности течения реки в период половодья становятся интенсивным источником загрязнения, существенно ограничивающим режим водопользования.

Работа посвящена трехмерному численному моделированию выноса примеси из дна реки. Расчетная область состояла из массива жидкости (реки), распространяющейся над пористой средой (дно реки). Проведены расчеты выноса, накопленных загрязнений в зависимости от гидрологического режима водоема-приемника. Численное моделирование транспорта примеси в двухслойной системе жидкость – пористая среда, насыщенная жидкостью, проводилось для параметров максимально приближенных к описанию течения, возникающего в естественных водных объектах. Промоделировано дальнейшее распространение шлейфа загрязняющих веществ. В результате проведения вычислений получены распределения концентрации рассола по глубине, получены критические параметры потока, при которых происходит залповый вынос загрязнений, исследован дальнейший характер распространения примеси.

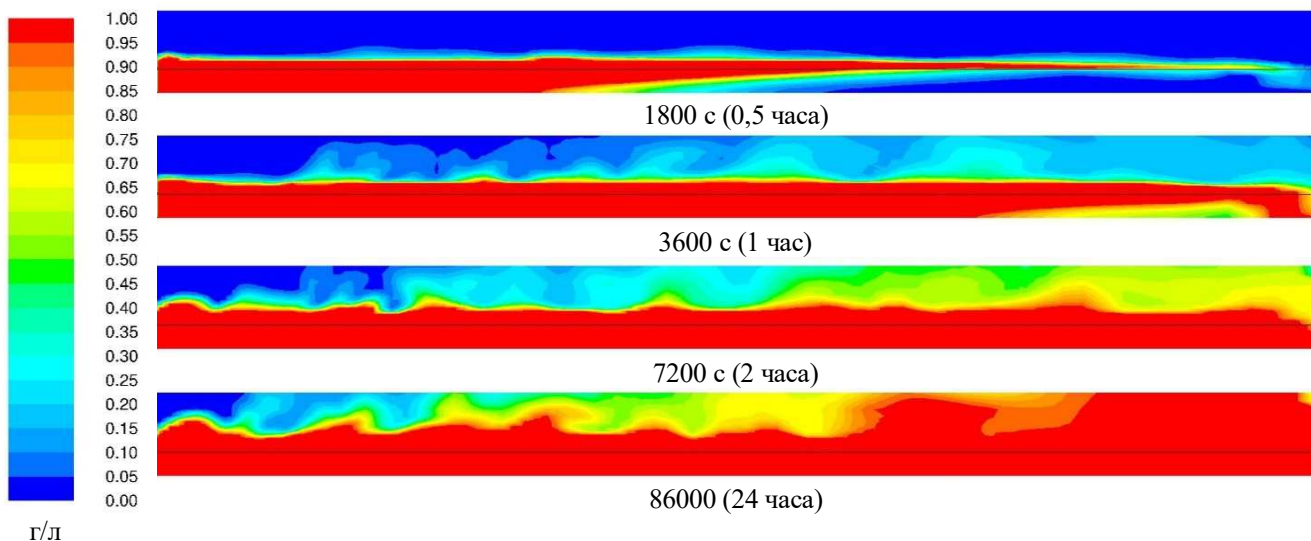


Рис. Поле концентрации примеси. Вертикальное сечение посередине расчетной области. Концентрация соли в сбрасываемом рассоле 300 г/л. Шкала концентрации представлена в диапазоне от 0 до 1 г/л.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20125).

1. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N. Numerical simulation of wastewater discharge into water objects to improve discharge devices. Journal Applied Mechanics and Technical Physics. 2020. Vol. 61, No. 7, pp. 203–209.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ СТРУКТУР, ФОРМИРУЕМЫХ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ В ЗОНАХ АКТИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА

Т.П. Любимова¹, Я.Н. Паршакова¹, В.Ю. Колчанов¹, А.П. Лепихин², Ю.С. Ляхин²,
А.В. Богомолов², А.А. Тиунов²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Горный институт УрО РАН, Пермь

parshakova@icmm.ru

Активное освоение Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (Россия) привело к тому, что в зону его влияния попадают не только водотоки - приемники сточных вод, но и водные объекты, на которые не оказывается прямого техногенного воздействия. Содержания макрокомпонентов в воде существенно неоднородно по глубине и характеризуется наличием резкого скачка плотности. Концентрация солей в придонном горизонте более чем на порядок превышает их содержание в приповерхностном слое. Так как забор воды на производственные цели, как правило, производится из придонных горизонтов, то данная стратификация создает серьезные проблемы с обеспечением устойчивого водоснабжения производственных объектов.

Для решения данных прикладных задач было проведено исследование формирования устойчивых плотностных структур на примере Верхне-Зырянского водохранилища (Россия, Пермский край), являющегося основным источником технического водоснабжения БКПРУ-2 и БКПРУ-4 ПАО УралКалий. Работа выполнялась на основе сопряжения натурных полевых исследований и вычислительных экспериментов, выполненных на основе построения гидродинамических моделей в 2D и 3D постановках [1]. Проведенные наблюдения показали, что данный водный объект характеризуется значительной вертикальной неоднородностью по минерализации. Минерализация воды в придонном горизонте практически на порядок превышает ее содержание в поверхностном слое. Граница раздела водных масс в зимний период повышается на ~0.5 м, а весной снижается. Вычислительные эксперименты показали, что при принятой конструкции водопропускного устройства на плотине водохранилища не может проходить эффективной промывки водохранилища при пропуске даже высоких весенних паводков. Свежая весенняя неминерализованная вода практически не замещает более минерализованную воду из придонных слоев.

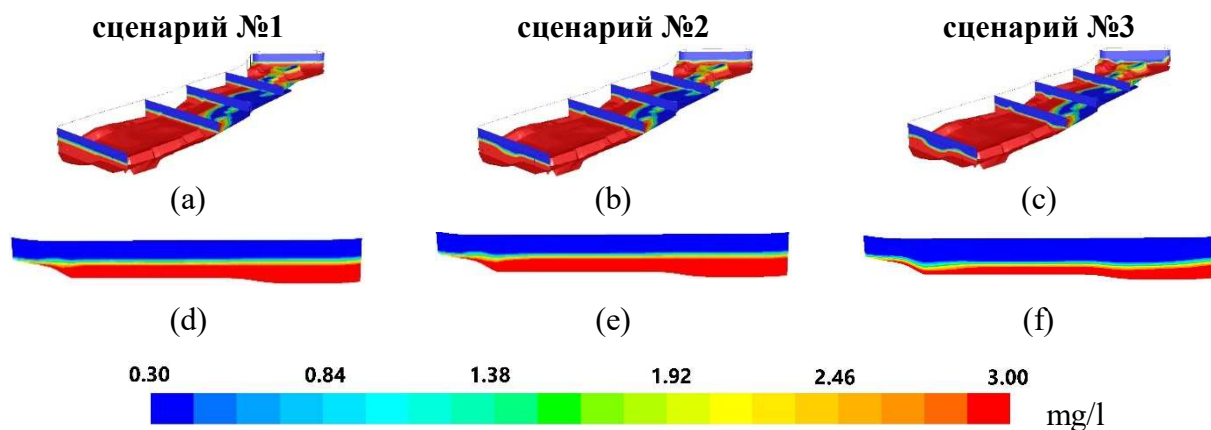


Рис. Распределения минерализации вблизи водозабора БКПРУ-4 на дне и в вертикальных сечениях на расстоянии 100 м, 1000 м, 1500 м, 2000 м, 3000 м от водопропускного устройства для расхода воды через водохранилище 0,3 м³/сек (а), 2,04 м³/сек (б), 8,51 м³/сек (с). Минерализация воды в вертикальном контрольном сечении поперек водохранилища вблизи водозабора 0,3 м³/сек (д), 2,04 м³/сек (е), 8,51 м³/сек (ф).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-20093).

1. Lyubimova, T., Lepikhin, A., Parshakova, Y., Bogomolov A., Lyakhin, Y., Tiunov, A. Peculiarities of hydrodynamics of small surface water bodies in zones of active technogenesis (On the example of the verkhne-zyryansk reservoir, russia). Water, 2021, 13(12), 1638.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ГОРЯЩИХ И ТЛЕЮЩИХ ЧАСТИЦ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПОЖАРОВ

В.В. Перминов¹, Д.П. Касымов^{1, 2}, М.В. Агафонцев^{1, 2}

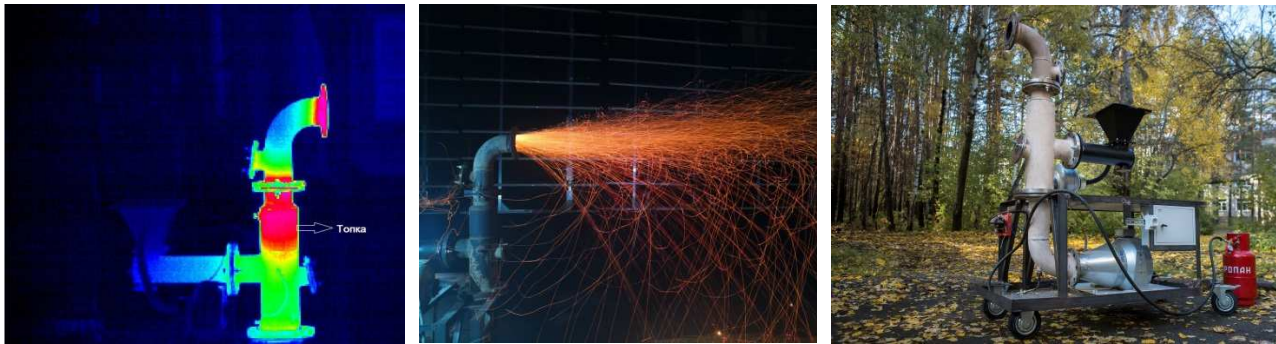
¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

²Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Томск

e-mail: ya.vladperminov2013@yandex.ru

В литературе известно, что распространение природных пожаров осуществляется за счет нескольких механизмов – радиационного и конвективного переноса тепла от пламени и переноса горящих и тлеющих частиц. В ряде случаев определяющую роль зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ) и распространения пожаров играют горящие и тлеющие частицы, которые переносятся конвективной колонкой фронта пожара и ветром, что приводит к образованию новых очагов.

В 2015 году в Институте оптики атмосферы СО РАН была сконструирована и изготовлена уникальная установка для генерации горящих и тлеющих частиц различного вида, размера и формы. Конструкция генератора позволяет широко варьировать энергетические характеристики потока горящих частиц [1, 2].



Использование генератора позволяет исследовать в полунатурных условиях перенос горящих и тлеющих частиц и условий зажигания ими подстилающей поверхности. Также дополнительно использование бесконтактного метода ИК-диагностики позволяет оценить температуру переносимых частиц, а также скорость их перемещения. Одной из важных характеристик горящих частиц, образующихся во время природных пожаров, является дальность переноса, а также их траектории полета. Использование ИК-камеры совместно с данной установкой позволяет успешно определить траектории горящих частиц, их температуру, а также при использовании тепловых реперов в поле зрения ИК-камеры может служить дополнительным инструментом при определении дальности переноса и размеров частиц.

Отдельной задачей при использовании генератора является исследование воздействия горящих и тлеющих частиц на древесные строительные материалы и конструкции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-34-90078.

1. Касымов Д.П., Перминов В.В., Фильков А.И., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Гордеев Е.В. Генератор горящих и тлеющих частиц // Патент РФ №183063. 2006. МПК F24B 1/00.

2. Касымов Д.П., Перминов В.В., Рейно В.В., Фильков А.И., Лобода Е.Л. Экспериментальная установка по генерации горящих частиц для исследования распространения природного пожара // Известия ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60. № 12/2. С. 107–112.

ИЗГИБ МНОГОСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПО-РАЗНОМУ СОПРОТИВЛЯЮЩЕЙСЯ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ

И.Е. Петраков¹

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск
e-mail: petrigr@icm.krasn.ru

Композитные материалы, используемые в различных областях промышленности, являются сложными по своей структуре материалами, состоящими из двух или более составляющих, между которыми можно провести отчетливую границу. В работе рассматривается волокнистый композитный материал, состоящий из армирующих нитей и материала матрицы. Благодаря своей структуре такой материал обладает такими свойствами как разномодульность и разнопрочность.

В работе рассматривается задача чистого изгиба многослойной композитной пластинки, по-разному сопротивляющейся растяжению и сжатию, в которой существует нейтральная плоскость под действием поперечной силы и контактная задача по взаимодействию пластины со штампом. Уравнение изгиба получено с помощью вариационного принципа Лагранжа. Составлен функционал упругой энергии:

$$J(w) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} (D_{11} \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \right|^2 + D_{22} \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right|^2 + 2D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} + F_{12} \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \right|^2 + 2F_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + 2F_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} - 2qw) dx_1 dx_2 - \int_{\Gamma} (Qw + M \frac{\partial w}{\partial n}) ds,$$

где Ω – двумерная область с границей Γ , $q(x_1, x_2)$ – распределенная поперечная нагрузка, $Q(x_1, x_2)$ и $M(x_1, x_2)$ – поперечное усилие и изгибающий момент на краях пластинки, D_{ij} и F_{ij} – изгибные жесткости.

Полученное уравнение численно решено с помощью метода конечных элементов с использованием треугольного элемента Белла.

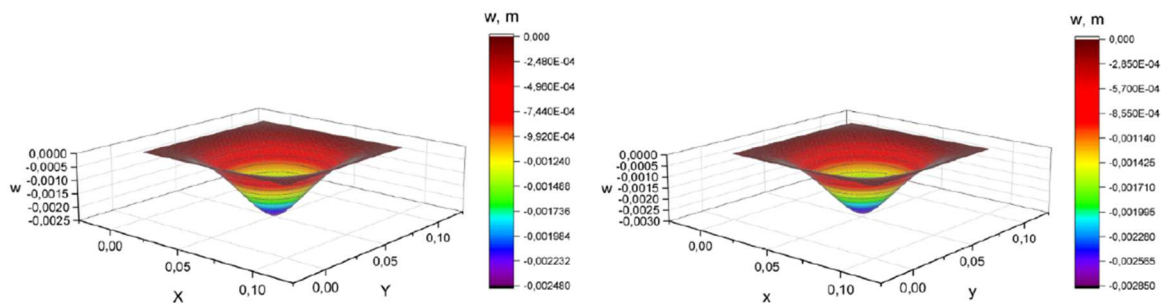


Рис. Изгиб однослойной композитной пластинки под действием поперечной нагрузки.

Рассмотрены различные конфигурации слоев композитного материала и взаимодействия со штампами различной формы. Проведены вычислительные эксперименты и показано влияние учета разномодульности на полученное решение. На рисунке представлены прогибы однослойной пластинки с учетом и без учета разномодульности, разница между которыми составляет около 15%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-31-90032. Автор выражает благодарность научному руководителю В. М. Садовскому.

1. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Petrakov I.E. On the theory of constitutive equations for composites with different resistance in compression and tension // Composite Structures, 2021, V. 268.

2. Annin B.D., Sadovskii V.M., Petrakov I.E., Vlasov A.Y. Strong bending of a beam from a fibrous composite, differently resistant to tension and compression // Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics, 2019, V. 12, № 5, pp. 533–542.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ЛИБРАЦИЙ НА ФОРМУ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

М.А. Петухова, В.Г. Козлов

Лаборатория вибрационной гидромеханики, Пермский Государственный Гуманитарно-Педагогический
Университет, Пермь
e-mail: mar.petuhova@yandex.ru

Целью исследования является экспериментальное и теоретическое изучение динамики границы раздела жидкостей различной плотности с высоким контрастом вязкостей в вертикальном тонком щелевом зазоре, совершающем модулированное вращение вокруг горизонтальной оси, в зависимости от частоты модуляции скорости. Как следует из результатов исследования, малый поперечный размер канала и разное по величине вязкое взаимодействие жидкостей со стенками канала играют определяющую роль в рассматриваемой задаче.

В [1] было обнаружено, что при заданной скорости вращения повышение амплитуды модуляции скорости приводит к пороговому возникновению рельефа в виде регулярной системы холмов на исходно осесимметричной межфазной границе, которая формируется в центробежном силовом поле. В течение периода вершины холмов вязкой жидкости совершают малой амплитуды покачивания, за исключением этого холмы остаются неподвижными в системе отсчета вращающейся полости.

В настоящей работе обнаружено, что положение границы раздела, порог устойчивости и форма надкритического рельефа на границе зависят от относительной частоты либраций. Показано, что при определенных соотношениях частот, в частности, при совпадении частот либрации и вращения кюветы, граница раздела жидкости теряет свою осевую симметрию, сформированную под действием центробежной силы. Центрифугированная вязкая жидкость смещается к границе кюветы. Дано теоретическое описание данного явления. Показано, что нарушение осевой симметрии вязкого включения связано с осредненным действием внешнего статического силового поля (силы тяжести). Нарушение осевой симметрии невозмущенной границы раздела, в свою очередь, оказывает определяющее влияние на порог устойчивости границы раздела и структуру возникающего рельефа (Рис.1), который становится асимметричным.

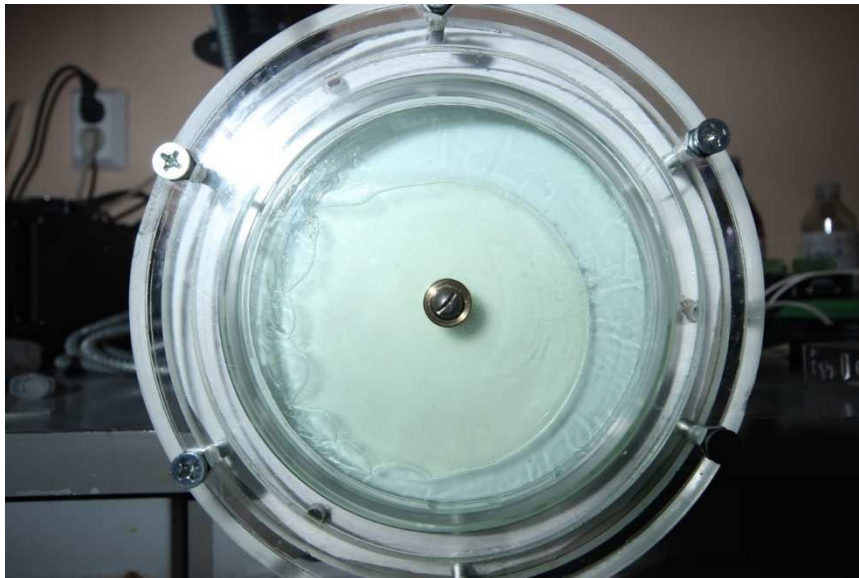


Рис.1. Граница раздела жидкостей (касторовое масло и флуоринерт FC-40) при частоте вращения $f_{\text{rot}}=2$ об/с, частоте модуляции $f_{\text{lib}}=2$ Гц и амплитуде модуляции скорости вращения $\varepsilon = 0.3$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 20-41-596011) и правительства Пермского края (проект Научных школ С26/119).

1. Kozlov V.G., Dementieva J.S., Kobeleva V.S., Petuhova M.A. Stability of interface between liquids with high viscosity contrast in unevenly rotating cavity // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1809. 012022.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ДРОБНОСТИ ДЛЯ ВЯЗКОУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПИСАНИИ СВОЙСТВ БЕТОНОВ И ПОЛИМЕРБЕТОНОВ

И.И. Попов¹, М.В. Шитикова¹, А.В. Левченко²

¹ Научный центр по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук имени заслуженного деятеля науки РФ, профессора Ю.А. Россихина, Воронежский государственный технический университет, Воронеж

² Кафедра строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова, Воронежский государственный технический университет, Воронеж
e-mail: 89042149140@mail.ru

При описании поведения вязкоупругих материалов, особенно в условиях динамических воздействий, применяются модели, содержащие дробные производные [1-2]. Порядок этих производных или так называемый параметр дробности является дополнительной микроструктурной характеристикой, описывающей изменения вязкости материала под воздействием различных факторов [3-4]. В настоящей работе представлено продолжение исследований [5-6] характеристик внутреннего трения бетонов и полимербетонов с помощью метода возмущенного импульса [7]. В качестве полимербетонов использовались каутоны и фиброкаутоны на основе низкомолекулярных каучуков марок ПБН и СКДН-Н. В качестве фибры применялись металлические волокна, изготовленные из обрезков металлокорда и армирующий модификатор цементных бетонов. Пропорции для расчета состава полимербетонов взяты в их оптимальных вариантах с точки зрения получения наилучших физико-механических характеристик. Исследования проводились в возрасте 7, 14, 28, 56, 91 и 182 дней. Опытным путем определены реальные значения параметра дробности для вышеуказанных строительных материалов, позволяющие применять модели с дробными производными для описания их поведения и полноценного учета их вязкоупругих свойств в условиях динамических нагрузок. Установлено влияние таких факторов, как возраст образцов, тип фибры, тип вяжущего на параметр дробности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-38-70143_Стабильность.

1. Rossikhin, Yu.A., Shitikova, M.V. Applications of Fractional Calculus to Dynamic Problems of Linear and Nonlinear Hereditary Mechanics of Solids // Applied Mechanics Reviews. 1997. Vol. 50, Issue 1. Pp. 15-67.
2. Rossikhin, Yu.A. Reflections on Two Parallel Ways in the Progress of Fractional Calculus in Mechanics of Solids // Applied Mechanics Reviews. 2010. Vol 63. Pp. 010701-1- 010701-12.
3. Popov, I.I., Rossikhin, Yu.A., Shitikova, M.V. and Chang, T.P. Impact Response of a Viscoelastic Beam Considering the Changes of its Microstructure in the Contact Domain // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2015. Vol. 19. Pp. 455-481.
4. Rossikhin, Yu.A., Shitikova, M.V., Popov, I.I. Dynamic Response of a Viscoelastic Beam Impacted by a Viscoelastic Sphere // Computers and Mathematics with Applications. 2017. Vol. 73. Pp. 970-984.
5. Popov, I.I., Rossikhin, Yu.A., Shitikova, M.V. Experimental Identification of the Fractional Parameter for a Viscoelastic Model of Concrete at Different Ages Based on the Impulse Excitation Technique // Advances in Rotor Dynamics, Control, and Structural Health Monitoring. Select Proceedings of ICOVP 2017. "Lecture Notes in Mechanical Engineering" Singapore, 2020. Pp. 349-358.
6. Popov I.I., Levchenko A.V., Shitikova M.V. Experimental Identification of the Fractional Parameter for Rubber Concrete and Fiber-Reinforced Rubber Concrete // JOINT EVENT ICCS23 - 23rd International Conference on Composite Structures & MECHCOMP6 - 6th International Conference on Mechanics of Composites. Book of Abstracts. Faculty of Engineering, University of Porto. 2020. Pp. 98-99.
7. Popov I.I., Shitikova M.V. Impulse Excitation Technique and its Application for Identification of Material Damping: An Overview // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. PaperID 022025, DOI:10.1088/1757-899X/962/2/022025.

АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В СВЕРХЗВУКОВОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА

С.С. Попович

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Одним из наиболее распространенных критериев оценки теплогидравлической эффективности каналов и трактов теплообменного и энергетического оборудования является коэффициент аналогии Рейнольдса – отношение коэффициента теплоотдачи, определяющего интенсивность теплообмена, к коэффициенту сопротивления, определяющего суммарные потери давления. Практически во всех методах интенсификации теплообмена (поверхностные турбулизаторы в виде ребер, штырьков, спиралей, вихревых камер и т.п.) коэффициент аналогии Рейнольдса снижается по сравнению с течением без интенсификаторов. Однако существуют отдельные перспективные способы интенсификации теплообмена, в которых наблюдается обратная тенденция опережающего роста теплообмена по сравнению с увеличением сопротивления: течение с положительным градиентом давления [1], использование вихреобразующего рельефа, формирование областей отрыва пограничного слоя и областей взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем [2]. В данной работе внимание сконцентрировано на исследовании аналогии Рейнольдса в отрывной области сверхзвукового потока.

Исследование проводилось на сверхзвуковом аэродинамическом стенде AP-2 с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний датчиков в среде LabView, термопар с термокомпенсацией, тепловизора и методов визуализации с помощью теневого прибора Теплера [3]. Число Маха набегающего потока варьировалось в диапазоне 2.0-3.0, температура торможения составляла около 293 К, число Рейнольдса, рассчитанное по длине динамического пограничного слоя от горла сопла, не менее $2 \cdot 10^7$.

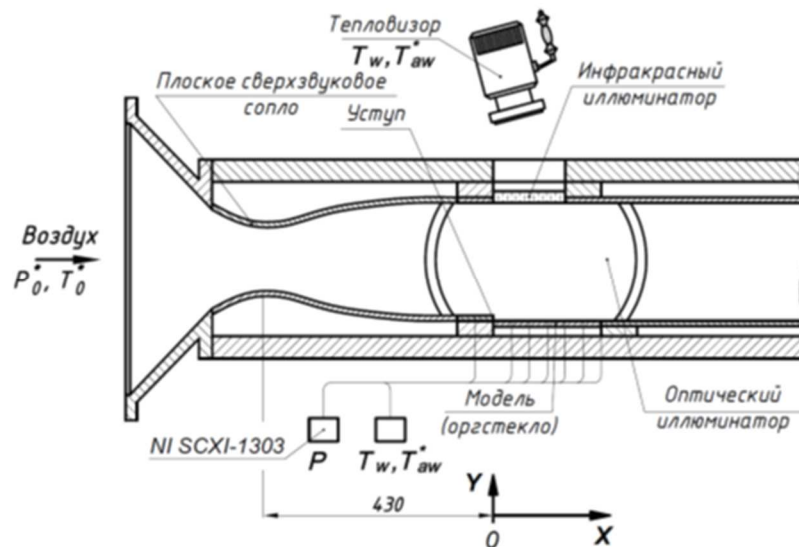


Рис. Схема проведения экспериментального исследования.

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ 19-79-10213.

1. Kiselev N.A., Leontiev A.I., Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Popovich S.S. Heat transfer and skin-friction in a turbulent boundary layer under a non-equilibrium longitudinal adverse pressure gradient // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2021. Vol. 89. P. 108801.

2. Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov U.A., Strongin M.M. Experimental research of supersonic aerodynamic cooling effect and its application for energy separation efficiency // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16. 2018. V. 212244. 8 p.

3. Попович С.С. Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35–45.

О ВОЗМОЖНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ СТЕНКИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ГАЗО-КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

С.С. Попович¹, А.И. Леонтьев^{1,2}, А.Г. Здитовец¹, Н.А. Киселёв¹, Ю.А. Виноградов¹

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

² МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Исследованию взаимодействия многофазных потоков с обтекаемыми телами посвящено множество работ [1]. Наличие даже небольшого количества примеси (доли процента) в основном потоке может приводить к значительным изменениям параметров на поверхности обтекаемого тела. В данной работе внимание сконцентрировано на влиянии впрыска водных капель в форкамере аэродинамической установки на температуру поверхности модели, установленной в сверхзвуковой рабочей части. Охлаждение обтекаемой стенки в этом случае может позволить повысить эффективность методов тепловой защиты, устройств безмашинного энергоразделения и способов интенсификации теплообмена [2].

В работе представлены результаты сравнительного исследования обтекания плоской модели сверхзвуковым однофазным и двухфазным (газо-капельным) потоками. Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде AP-2 (схема стенда представлена на рисунке) с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний датчиков в среде LabView, термопар с термокомпенсацией, зондовых измерений, тепловизора, методов визуализации лазерным ножом и с помощью масло-сажевого покрытия.

Проведена серия экспериментальных измерений темпа охлаждения плоской модели и распределения температуры поверхности, обтекаемой сверхзвуковым газовым и газо-капельным потоками [3]. Числа Маха набегающего потока варьировались в диапазоне от 2.0 до 3.0. Относительный массовый расход жидкости (массовая концентрация) составлял до 0.5%. Жидкость (дистиллированная вода) распылялась через каскад центробежных форсунок мелкодисперсного распыла в воздушный поток в форкамере.

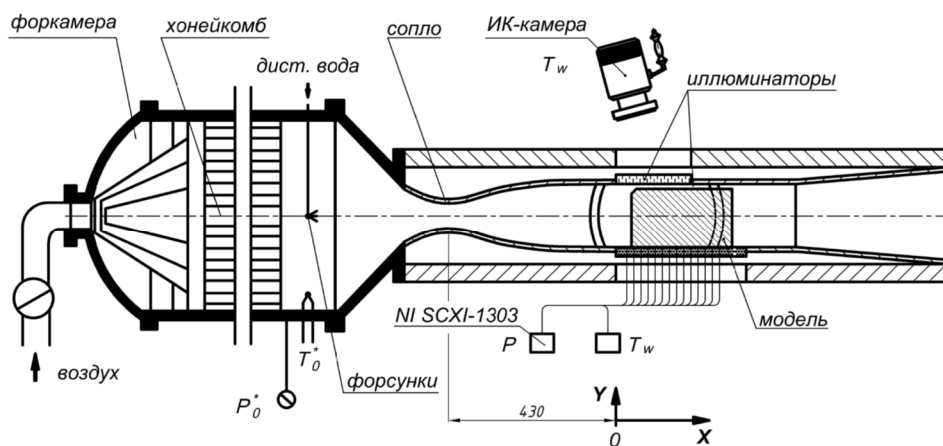


Рис. Схема проведения экспериментального исследования.

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ.

1. Вараксин А.Ю. Обтекание тел дисперсными газовыми потоками (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 2. С. 282-305.

2. Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov U.A., Strongin M.M. Experimental research of supersonic aerodynamic cooling effect and its application for energy separation efficiency // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16. 2018. V. 212244. 8 p.

3. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А., Медвецкая Н.В. Измерение адиабатной температуры стенки плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2020. № 5.

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

С.С. Попович¹, А.И. Леонтьев^{1,2}, А.Г. Здитовец¹, Н.А. Киселёв¹, Ю.А. Виноградов¹

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

² МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Под термином «энергоразделение» понимается перераспределение полной температуры в потоке газа без совершения им внешней работы и теплообмена с окружающей средой. На входе в устройство энергоразделения – исходно сжатый газ, на выходе – охлажденный и подогретый газовые потоки. В технике известен способ сверхзвукового безмашинного энергоразделения газового потока (труба Леонтьева) [1]. Принцип действия способа: сжатый газ делится на два потока, первый разгоняется до сверхзвуковой скорости, а второй – дозвуковой поток – направляется с противоположной стороны от разделяющей потоки перегородки. В результате взаимодействия через теплопроводную перегородку сверхзвуковой поток разогревается, а дозвуковой охлаждается.

Одним из возможных применений способа сверхзвукового безмашинного энергоразделения является создание технологии предотвращения гидратообразования при редуцировании давления природного газа на газораспределительных станциях [2]. Интегральный дроссель-эффект снижения температуры природного газа составляет 4-6 градусов при снижении давления на 1 МПа. К гидратообразующим компонентам природного газа относятся метан, этан, пропан, изобутан, углекислый газ, сероводород и некоторые другие. Ранее было показано, что дроссель-эффект охлаждения газа при работе устройства на воздухе полностью перекрывается нагревом сверхзвукового потока от дозвукового.

В рамках данной работы проводится исследование прототипа устройства сверхзвукового безмашинного энергоразделения при работе на гидратообразующем компоненте природного газа – углекислом газе. В задачи исследования входило измерение распределения статического давления и температурного дроссель-эффекта при течении в канале сверхзвукового потока воздуха и углекислого газа в сравнении с течением в канале с дроссельной шайбой, а также оценка уровня нагрева сверхзвукового потока углекислого газа в исследуемом устройстве.

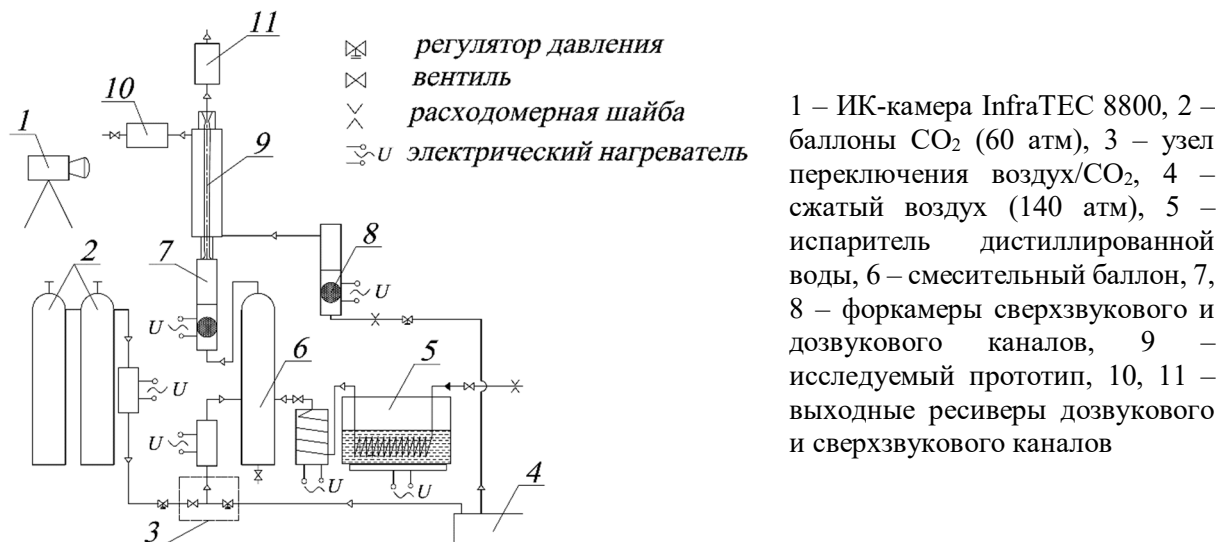


Рис. Схема экспериментального стенда с прототипом устройства безмашинного энергоразделения.

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ №19-19-00234.

1. Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov U.A., Strongin M.M. Experimental research of supersonic aerodynamic cooling effect and its application for energy separation efficiency // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16. 2018. V. 212244. 8 p.

2. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Макарова М.С. Использование метода сверхзвукового безмашинного энергоразделения при редуцировании давления природного газа // Тепловые процессы в технике. 2019. № 1. С. 2-15.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИКИ И ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА РАДИАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

И.О. Ракишева, А.Р. Хайрулин, А.Г. Кучумов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: riolegovna@yandex.ru

Вентиляторы радиальные – агрегаты, предназначенные для перемещения воздуха, широко применяются для вентилирования в промышленных, жилых и административных помещениях и зданиях. Рабочие колеса изготавливаются из стали или сплавов алюминия, а КПД таких вентиляторов варьируется от 0,51 до 0,83. Необходимо улучшить характеристики вентилятора, при сохранении скорости вращения и произвести прочностной расчет рабочего колеса из полипропилена марки РРС.

Все расчёты производились в программном пакете Ansys Workbench. Модель состоит из проточной части (улитки) и рабочего колеса, которое состоит из лопаток и дисков крепления. Рабочее колесо создано с помощью инструмента BladeEditor, что позволило варьировать угол наклона β , ширину, высоту и количество лопаток.

В результате разработана методика, позволяющая моделировать газодинамические параметры радиального вентилятора. Получены распределения скоростей, давлений и массового расхода на выходной границе вентилятора и поля напряжений и деформаций оптимизированного рабочего колеса.

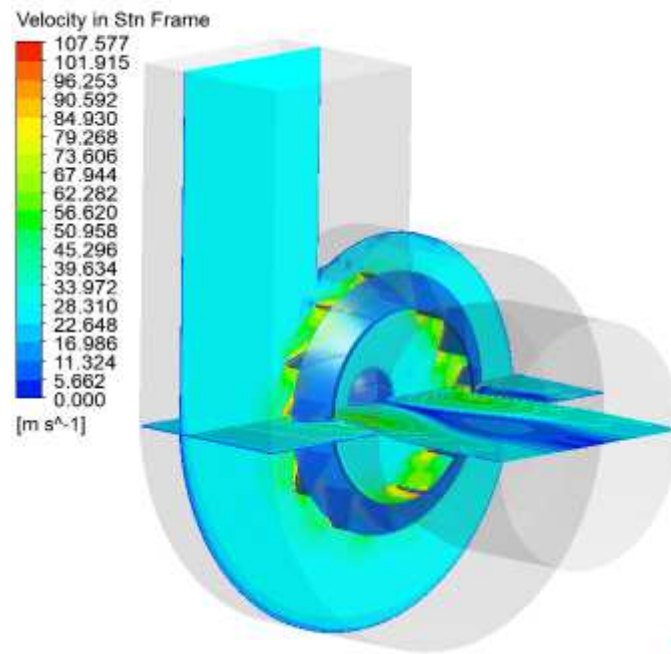


Рис. Распределение скоростей в срединных плоскостях радиального вентилятора.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЗЫРЬКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССУ ФЛОТАЦИИ

К.А. Рыбкин^{1,2}, Т.П. Любимова^{1,2}, О.О. Фатталов^{1,2}, М.О. Кучинский^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

e-mail: k.rybkin@gmail.com

В настоящей работе экспериментально исследуется возникновение, динамика и взаимодействие парогазовых пузырьков, возникающих вследствие коалесценции кавитационных пузырьков при ультразвуковом (УЗ) воздействии, с поверхностью твердого тела при кондиционировании флотационной пульпы и последующей флотации.

В экспериментах использовалась лабораторная флотомашинка ФМП-Л1, оснащенная аэрационным механизмом пневмомеханического типа с прямым (безременным) электроприводом. Для проведения кондиционирования исследуемой пульпы использовался сонохимический реактор, представляющий собой кювету, изготовленную из оргстекла толщиной 3 мм. В центральной части дна кюветы располагался источник УЗ. Для визуализации пузырьков в различных экспериментах использовался либо лазерный нож, создаваемый цилиндрической линзой и зеленым лазером KLM 532, либо светодиодный коллимированный источник света. Для регистрации динамики пузырьков использовалась высокоскоростная камера Basler A504кс с телецентрическим макро-объективом и зеркальная камера Nikon D7200 [1, 2].

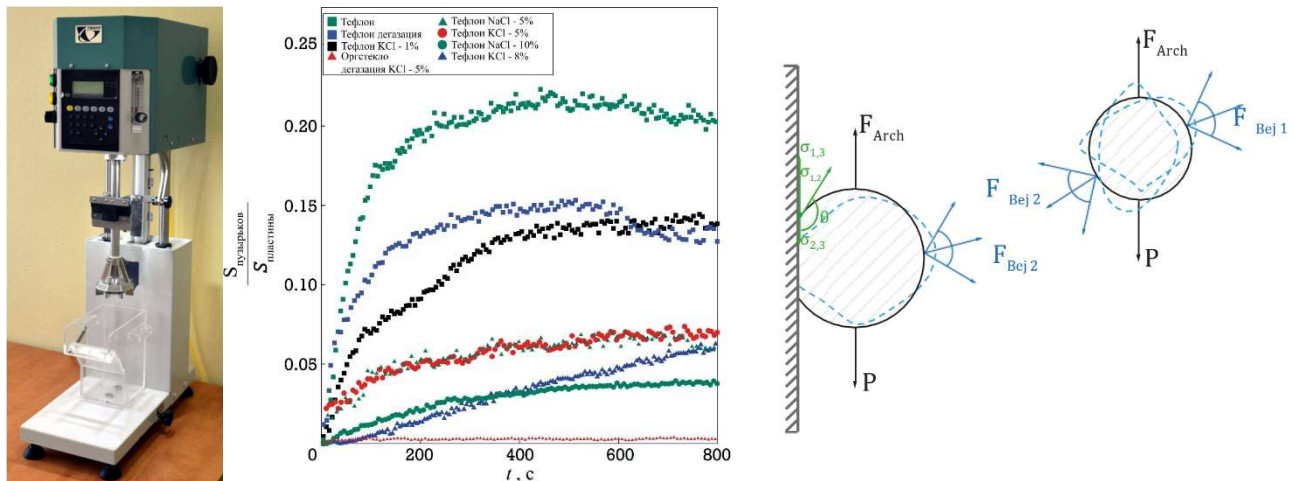


Рис. Слева общий вид лабораторной флотационной машины, по центру график зависимости относительной площади, покрытой пузырьками, от времени, справа иллюстрация сил, действующих на пузырек в вибрационном поле.

Во всех сериях эксперимента гидрофобность поверхности способствовала прикреплению к ней пузырьков. Диаметр прикрепленных пузырьков непрерывно увеличивался в течение всего времени ультразвукового облучения за счет коалесценции с пузырьками возникающих в результате акустической кавитации. Парогазовые пузырьки оставались прикрепленными к гидрофобной поверхности и не всплывали, так как поверхностные силы превышали силу Архимеда. Динамика парогазовых пузырьков на гидрофильной поверхности качественно отличается от динамики пузырьков на гидрофобной поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №20-69-46066).

1. Rybkin K.A. et al. Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2017. V. 879. N. 1. P. 012026.

2. Fattalov O., Lyubimova T., Rybkin K., Kuchinskiy M. Experimental study of the processes of formation, drift and levitation of vapor-gas bubbles in water containing surfactant under the action of ultrasound // Microgravity Science and Technology. 2021. V. 33. N. 2. P. 1-7.

СЕДИМЕНТАЦИЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Д.А. Рязанов¹, И.Н. Сибгатуллин^{1,2}

¹Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

e-mail: ryazanov@ispras.ru

В устойчиво стратифицированной жидкости очень часто возникают внутренние волны. Благодаря сохранению угла отражения внутренних волн от наклонных поверхностей и особому дисперсионному соотношению внутренние волны имеют свойство фокусировки. Одним из самых распространенных примеров стратифицированной жидкости служит океан. Из-за комбинаций неровностей морского дна фокусировка внутренних волн происходит многократно [1]. Многократная фокусировка внутренних волн ведет к образованию замкнутых траекторий групповых скоростей внутренних волн, так называемых аттракторов внутренних волн [2].

В природных условиях аттракторы возникают под воздействием нескольких частот [3], в условиях сложной геометрии морского дна и при наличии частиц, примесей, которые подвержены осаждению.

Целью этой работы является изучить поведение частиц, которые медленно оседают в стратифицированной жидкости в условиях существования аттрактора внутренних волн. В качестве метода исследования используется квазигидродинамический подход и его реализация на базе открытого математического пакета OpenFOAM [4].

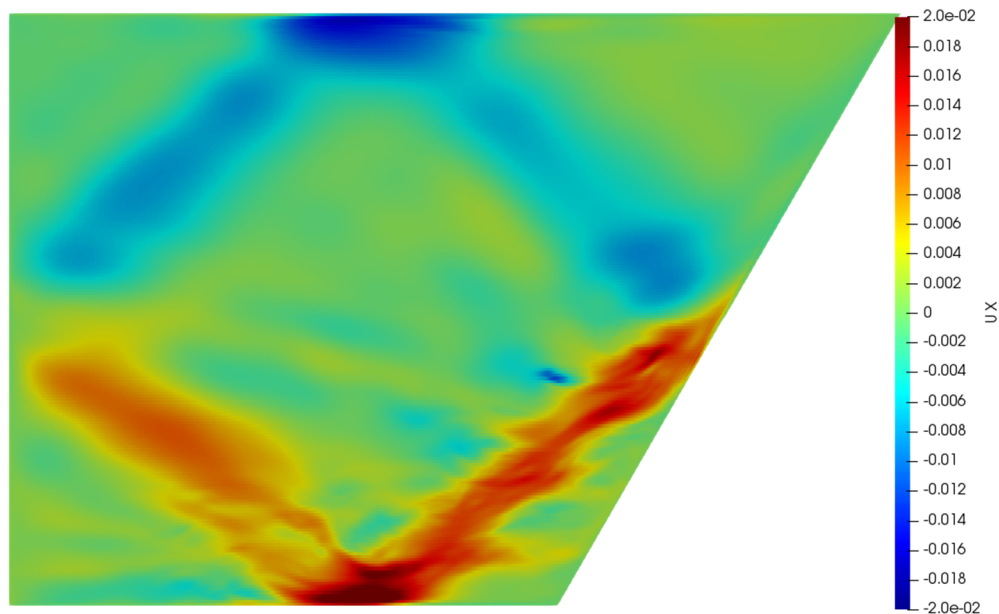


Рис. Горизонтальная компонента поля скорости после многократной фокусировки внутренних волн.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-11-00169.

1. Guo Yuan, Holmes-Cerfon Miranda. Internal wave attractors over random, small-amplitude topography // *Journal of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 787. P. 148–174.

2. Sibgatullin I.N., Ermanyuk E.V., Vatutin K.A. et al. Numerical simulation of three-dimensional wave attractors // *The XXVII workshop of the Council of nonlinear dynamics of the Russian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 47. N. 1. P. 112–115.

3. Рязанов Д.А., Провидухина М.И., Сибгатуллин И.Н., Ерманюк Е.В. Бигармонические аттракторы внутренних гравитационных волн // *Механика жидкости и газа*. 2021. № 3. С. 90-99.

4. Репозиторий открытого исходного кода реализации квазигидродинамического подхода на базе OpenFOAM [электронный ресурс] // github.com: система хранения исходного кода.

РАСЧЕТ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ТЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МКЭ В СМЕШАННОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ

Н.А. Гуреева¹, В.В. Рябуха²

¹ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве РФ», Москва

²ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград
e-mail: natalya-gureeva@yandex.ru

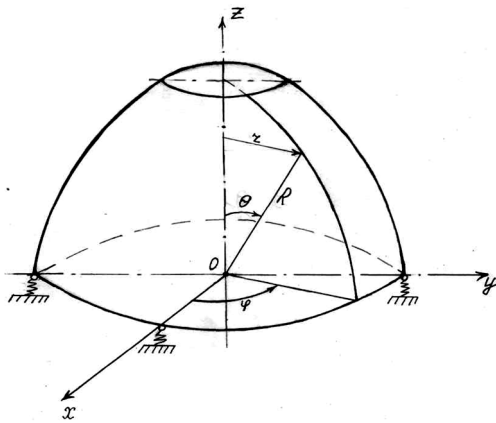


Рис.1. Оболочка вращения.

В расчете произвольно нагруженной оболочки вращения (Рис.1) при шаговом процессе нагружения используется метод конечных элементов (МКЭ) в смешанной формулировке при учете физической нелинейности на основе теории пластического течения. В качестве конечного элемента выбрана в глобальной системе координат призма с треугольным основанием. Узловыми неизвестными приняты приращения перемещений и приращения напряжений. Для выполнения численного интегрирования по объему конечного элемента он отображается на локальную призму с основанием в форме равнобедренного треугольника (координаты $0 \leq \xi, \eta \leq 1$) с координатой ζ по высоте, изменение которой выражается неравенством $-1 \leq \zeta \leq 1$.

Для выражения глобальных координат через их узловые значения использовались линейные функции от координат ξ, η [1] и линейные функции от координаты ζ [1]. Такие функции использовались и для аппроксимации как приращений перемещений внутренней точки конечного элемента через их узловые значения, так и для приращений напряжений.

Определяющие уравнения на шаге нагружения принимались на основе теории пластического течения. Полные приращения деформаций являются суммой деформаций упругих и пластических [2]. Приращения упругих деформаций получались на основе закона Гука. Приращения пластических деформаций определялись на основе гипотезы о пропорциональности приращений пластических деформаций компонентам девиатора полных напряжений. Коэффициент пропорциональности при этом является функцией отношения приращения интенсивности напряжений к интенсивности напряжений. Приращения интенсивности напряжений представлялись в общем виде зависимостью от приращений напряжений. После чего в матричном виде формировались соотношения между полными приращениями деформаций и приращениями напряжений.

Матрица напряженно-деформированного состояния конечного элемента на шаге нагружения формируется с использованием функционала, основанного на равенстве возможных и действительных работ внешних и внутренних сил с заменой в нем действительной работы внутренних сил разностью полной работы приращений напряжений и их дополнительной работы [3].

После подстановки в функционал определяющих уравнений в матричном виде и аппроксимирующих выражений искомых величин (приращений перемещений и приращений напряжений) выполняется его минимизация по узловым неизвестным, в результате чего получается матрица напряженно-деформированного состояния конечного элемента на шаге нагружения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-41-340004 p_a.

1. Гуреева Н.А., Треугольный конечный элемент в смешанной постановке для плоской задачи теории упругости / Н.А. Гуреева, В.В. Рябуха // Материалы II международной НПК «Материаловедение, машиностроение и энергетика: проблемы и перспективы развития». –2021. –том 1100. – С.1–5.

2. Малинин Н.Н., Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М: Машиностроение, 1975. – 400 с.

3. Гуреева Н.А., Реализация деформационной теории пластичности в расчетах плосконапряженных пластин на основе МКЭ в смешанной формулировке / Н.А. Гуреева, Д.П. Арьков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2011. – №2. –С. 12–15.

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДОРОВЫХ И ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ТВЁРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБА

Е.В. Садырин¹, Д.В. Ёгина², М.В. Свэйн^{1,3}, С.М. Айзикович¹

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

²Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону

³ Университет Сиднея, Сидней

e-mail: owlsquall@gmail.com

Начальная стадия кариеса характеризуется деминерализацией эмали (как в коронковой части, так и в пришеечной) без кавитации. При этом происходит повреждение основного структурного компонента твёрдых тканей зуба – кристаллов гидроксиапатита, которые либо растворяют центры кристаллов, либо участки на их периферии [1]. Подобная патология называется кариесом в стадии белого пятна, причем в некоторых случаях в процесс может быть также вовлечен дентин в окрестности деминерализованной эмали. В клинической практике все большее распространение получают малоинвазивные методы лечения ранних стадий кариеса. Использование реминерализующих агентов направлено на восстановление естественной структуры эмали, тогда как методы инфильтрации позволяют избежать использования стоматологического бора и анестезии, сводя удаление тканей зуба к минимуму. Принимая результаты исследований характеристик тканей в областях кариеса в стадии белого пятна как контрольные, стоматологи могут *in vitro* отслеживать изменения, возникающие в патологических тканях после минимально инвазивного лечения.

В настоящей работе изучен комплекс характеристик (плотность минерализации, приведенный модуль Юнга, твердость индентирования, средняя шероховатость, максимальная высота шероховатости) и особенностей (структура поверхности, молекулярный состав, ползучесть при индентировании) здоровых эмали и дентина, а также этих же тканей в окрестности области раннего кариеса на зубе человека (некоторые результаты представлены на Рисунке 1). Были использованы следующие методы: наноиндентирование (проведено в РЦКП НОЦ «Материалы» ДГТУ), рентгеновская компьютерная микротомография, атомно-силовая, оптическая и сканирующая электронная микроскопия, а также рамановская спектроскопия [2].

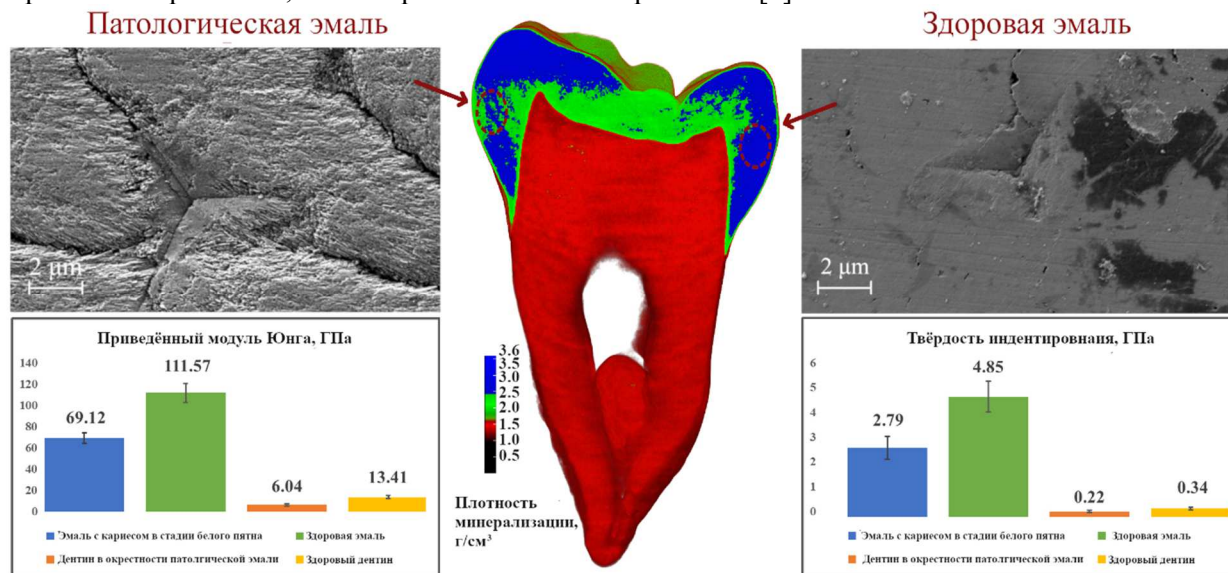


Рисунок 1. Некоторые результаты, полученные в ходе настоящего исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ № 14.Z50.31.0046.

1. Yanagisawa T., Miake Y. High-resolution electron microscopy of enamel-crystal demineralization and remineralization in carious lesions //Microscopy. 2003. Т. 52. №. 6. С. 605-613.
2. Sadyrin E., Swain, M., Mitrin, B., Rzhepakovsky, I., Nikolaev, A., Irkha, V., Yogina, D., Lyanguzov, N., Maksyukov, S. Aizikovich, S. Characterization of Enamel and Dentine about a White Spot Lesion: Mechanical Properties, Mineral Density, Microstructure and Molecular Composition //Nanomaterials. 2020. Т. 10. №. 9. С. 1889.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МЕКАНУМ-ПЛАТФОРМЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЮ КОЛЕС, ИНЕРЦИОННОСТЬ РОЛИКОВ И ПОЛИКОМПОНЕНТНОЕ КОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ

Г.Р. Сайпулаев, Б.И. Адамов, А.И. Кобрин

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
 e-mail: saypulaevgr@mail.ru

В рамках данного исследования ставится задача построения системы уравнений динамики всенаправленной роликосущей меканум-платформы с учетом конструкции колес, инерционности роликов и поликомпонентного контактного трения. Актуальность работы обусловлена широким применением всенаправленных платформ и отсутствием моделей динамики меканум-платформ, учитывающих инерционность роликов. При этом известно, что: конструкция колес и модель контактного трения существенно влияют на динамику меканум-платформы [1, 2]; а влияние инерционности роликов на динамику омни-платформы показано в [3].

В уравнениях кинематики всенаправленных платформ, составленных при учете реальной конструкции меканум-колес, имеются периодические разрывные функции, которые зависят от углов поворота колес и возникают из-за конечного числа роликов, расположенных на периферии колес, и смены контактирующих роликов (см., например, работу [1]). В связи с указанным обстоятельством при составлении уравнений динамики меканум-платформы с учетом инерционности роликов и конструкции колес возникают проблемы с дифференцированием разрывных функций.

Работоспособность и качество разработанной модели демонстрируется на примере построения уравнений динамики платформы робота *KUKA youBot*, оснащенной двумя парами меканум-колес. Кинематическая схема указанной платформы изображена на рисунке.

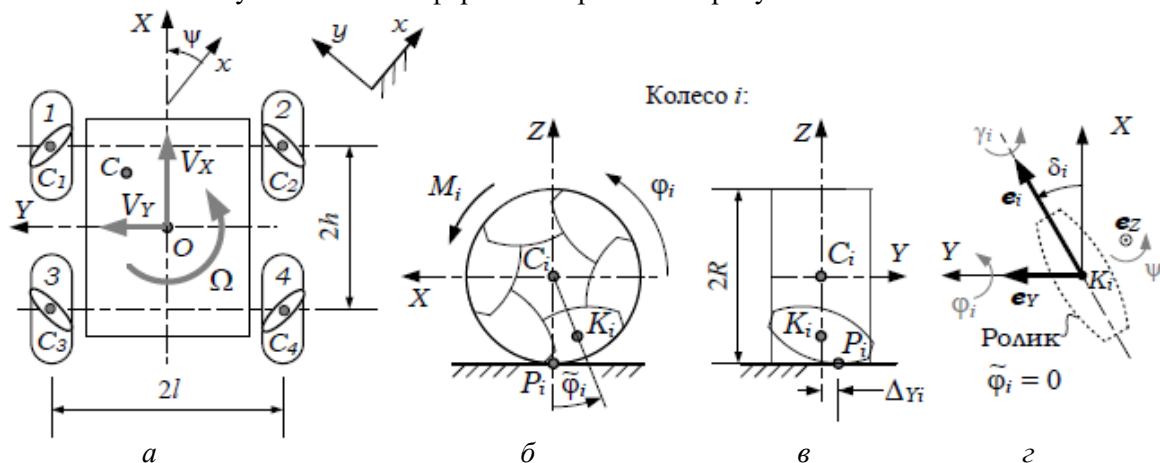


Рис. 1. Кинематическая схема: (а) – платформа, (б) – меканум-колесо, (в) и (г) – контактирующий ролик.

Для построения уравнений динамики используется формализм Аппеля. При получении инерционных слагаемых во избежание дифференцирования разрывных периодических функций предлагается заменить эти функции их средними значениями. Для нахождения средних значений функций, входящих в уравнения кинематики, используется метод осреднения по фазовым переменным – углам поворота контактирующих роликов. По результатам моделирования показаны отличия в траекториях движения, возникающие при учете инерционности роликов, по сравнению с результатами для модели динамики, не учитывающей инерционность роликов.

1. Adamov B.I., Saipulaev G.R. Research on the dynamics of an omnidirectional platform taking into account real design of mecanum wheels (as exemplified by KUKA youBot) // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2020. Vol. 16. N. 2. P. 291–307.

2. Адамов Б.И., Кобрин А.И., Сайпулаев Г.Р. Исследование динамики всенаправленной платформы при различных уровнях детализации моделей меканум-колёс и контактных сил // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т.1: Общая и прикладная механика. 2019. С. 522–524.

3. Герасимов К.В., Зобова А.А. Движение симметричного экипажа на омни-колесах с массивными роликами // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82. Вып. 4. С. 427–440.

МЕТОД УЗЛОВЫХ СИЛ ДЛЯ ГИПЕРУПРУГОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧАМ БИОМЕХАНИКИ

В.Ю. Саламатова^{1,3}, А.А. Лёгкий², Ю.В. Василевский^{1,2,3}

¹ПМГМУ имени И.М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва

²МФТИ, Долгопрудный

³ИВМ РАН, Москва

e-mail: salamatova@gmail.com

Моделирование напряженно-деформированного состояния мягких тканей зачастую сопряжено с использованием гиперупругих моделей. В работе описан метод приближенного решения задач нелинейной теории упругости в рамках конечных деформаций для случая гиперупругих материалов. Метод основан на использовании P1-конечных элементов и интерполяционных свойств барицентрических координат. Данный метод позволяет аналитически записать конечно-элементные уравнения для различных мер деформации, что способствует уменьшению объема вычислений, простоте и общности реализации по сравнению с классическими технологиями, основанными на использовании гессиана упругого потенциала.

Предложенный подход был реализован [2, 3, 4] для мер деформаций, основанных на полярном и верхнетреугольном (QR) разложении градиента деформации [1]. Отметим, что мера деформации, основанная на QR-разложении градиента деформации, позволяет использовать экспериментальные данные о механическом поведении материала непосредственно (без априорно заданного вида модели), что позволяет избежать неопределенности восстановления вида определяющих соотношений по экспериментальным данным.

В рамках развития модельно-независимых подходов (использующих таблично заданные экспериментальные данные) для моделирования напряженно-деформируемых состояний упругих тел предложенные методы протестированы на примере модельных задач для гиперупругих мембран [5].

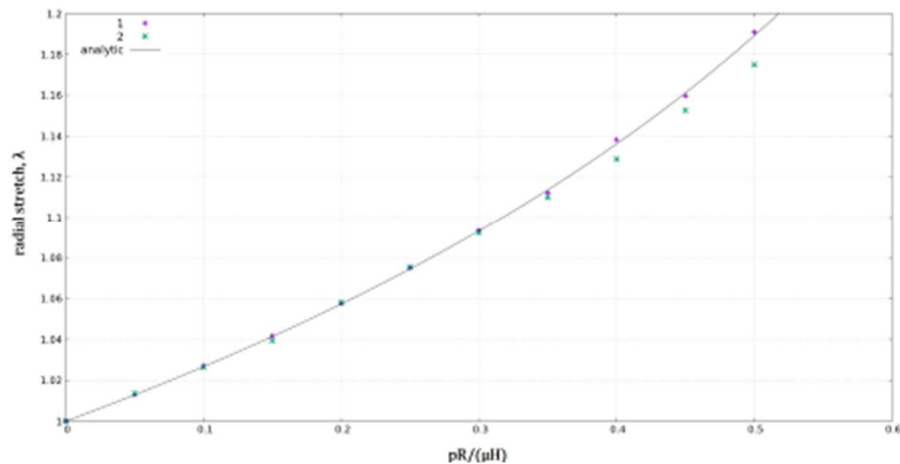


Рис. 1. Сравнение аналитического и численного решений зависимости радиуса раздуваемого цилиндра от безразмерного давления для неогукковского материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 19-71-10094).

1. Srinivasa A.R. On the use of the upper triangular (or QR) decomposition for developing constitutive equations for Green-elastic materials //International Journal of Engineering Science. 2012. Т. 60. С. 1-12.
2. Salamatova V.Y., Liogky A.A. Method of Hyperelastic Nodal Forces for Deformation of Nonlinear Membranes //Differential Equations. 2020. Т. 56. №7. С. 950-958.
3. Василевский Ю. В., Саламатова В. Ю., Лозовский А. В. О компактных формулах расчета деформаций мягких биологических тканей //Дифференциальные уравнения. – 2017. – Т. 53. – №. 7. – С. 935-935.
4. Саламатова В. Ю. Конечно-элементный метод расчёта трёхмерной деформации гиперупругих материалов //Дифференциальные уравнения. – 2019. – Т. 55. – №. 7. – С. 1023-1032.
5. Salamatova V. Y., Liogky A. A. Hyperelastic membrane modelling based on data-driven constitutive relations //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2020. – Т. 35. – №. 3. – С. 163-173.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ С ПОЛНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ СОПРЯЖЕНИЕМ

Ф.А. Сёмин, А.К. Цатурян

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: f.syomin@imec.msu.ru

В настоящее время предпринимаются многочисленные попытки применения моделей сердечной мышцы, миокарда, для исследования условий зарождения и длительного существования аритмий в стенках камер сердца, а также для выработки рекомендаций по их лечению. Имеются опытные данные о зависимости скорости распространения волны возбуждения в миокарде от его деформации. Однако большинство моделей мышцы не только не учитывают эту механо-электрическую обратную связь, но и, зачастую, не содержат какого-либо описания активной механики миокарда. Представленные в литературе модели миокарда не показывают важные зависимости развиваемой мышцей силы от частоты стимуляции, и моделируемое ими распространение волн электрического возбуждения представляется нам недостаточно адекватным.

В докладе предложена новая модель электромеханики сердечной мышцы, включающая описание цепочки процессов, ведущих от электрической активации мышцы к её механическому сокращению, и влияния напряжённо-деформированного состояния мышцы на характеристики волны электрической активации. Механический блок представлен разработанной нами ранее моделью [1], учитывающей процессы взаимодействия сократительных и регуляторных белков мышцы и воспроизводящей большой набор опытных данных. Электрофизиологический блок представлен простой феноменологической моделью [2], которая хорошо воспроизводит вид разности потенциала на мембране и его изменение с частотой стимуляции. Для электромеханического сопряжения использована модель [3], которую была упрощена и модифицирована. Эта модель учитывает важный механизм кальций-инициируемого высвобождения кальция в клетку.

Решена задача о сокращении цилиндрического образца сердечной мышцы в различных режимах деформации и нагружения. Полученные результаты демонстрируют согласованные с опытными данными зависимости силы и внутриклеточной концентрации ионов кальция от частоты стимуляции или длительности одиночной паузы после периодического сокращения. Модель воспроизводит важные медленные эффекты, связанные с изменением длины мышцы или частоты стимуляции.

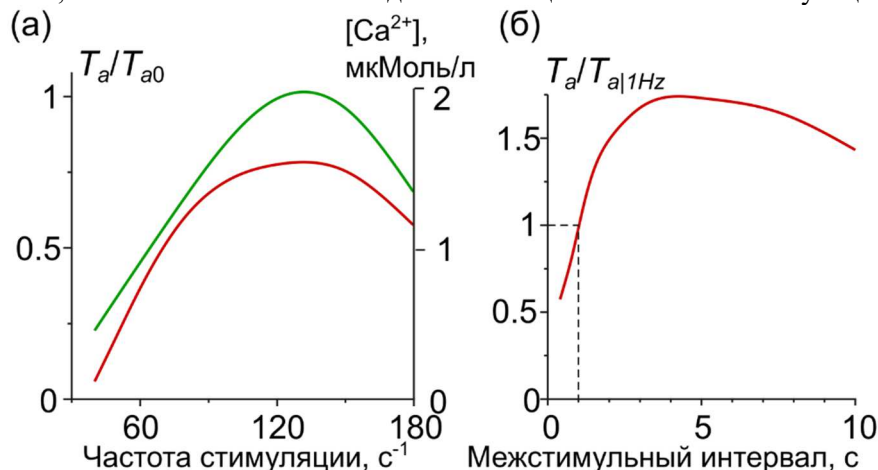


Рис. Зависимости нормированного пикового напряжения (красный) и пиковой концентрации внутриклеточного кальция (зелёный) от частоты стимуляции (а) и зависимость нормированного пикового напряжения, развиваемого мышцей после паузы в стимуляции с частотой 1 Гц, от величины этой паузы.

Работа поддержана грантом РФФ № 20-74-00046.

1. Syomin FA, Tsaturyan AK. A simple model of cardiac muscle for multiscale simulation: Passive mechanics, crossbridge kinetics and calcium regulation // J Theor Biol. 2017. V. 420. P. 105-116.
2. Aliev RR, Panfilov AV, A simple two-variable model of cardiac excitation // Chaos, Solitons & Fractals. 1996. V. 7(3). P. 293-301.
3. ten Tusscher KH, Panfilov AV. Alternans and spiral breakup in a human ventricular tissue model // Am J Physiol Heart Circ Physiol. 2006. V. 291(3). P. H1088-H1100.

ВИХРЕВЫЕ КЛАСТЕРЫ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СЛОЯХ С НЕОРТОГОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

И.Н. Сибгатуллин^{1,2}, Е.В. Ерманюк³, Н.Д. Шмакова³, А.А. Третьяков¹

¹ИСП РАН им. В.П. Иванникова, Москва

²ИО РАН им. П.П. Ширшова, Москва

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

e-mail: sibgat@ocean.ru

Преобразования энергии от крупномасштабных течений, вызываемых внешними воздействиями, являются объектом пристального внимания в силу важности приложений в геофизических, астрофизических и технических областях. Для планетарных систем в качестве внешнего воздействия могут выступать глобальные приливы, деформирующие жидкую оболочку. В частности, одним из важных проявлений являются крупномасштабные вихревые структуры типа волн Россби. Для выяснения базовых закономерностей формирования крупномасштабных структур в турбулентных режимах мы провели ряд численных и лабораторных экспериментов. Ранее [5, 6] нами были выявлены закономерности аккумуляции волновой энергии во вращающихся слоях и механизмы потери устойчивости. При развитии нелинейных режимов возникает каскад триадных резонансов, приводящий к мелкомасштабным течениям и возникает обратный каскад, при котором возникают крупные (в терминах размеров слоя) вихревые структуры, медленно дрейфующие в азимутальном направлении. Таким образом, мы как численно, так и экспериментально получили преобразование симметрично поступающей механической энергии в азимутальный дрейф крупномасштабных вихревых структур. Проводится сопоставление полученных режимов с известными ранее теориями дрейфа крупномасштабных вихревых структур.

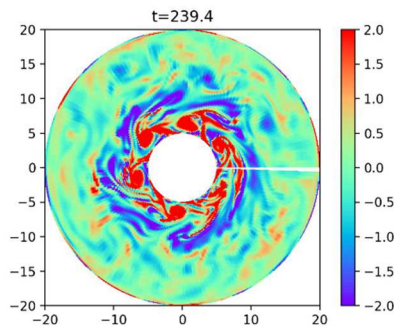


Рис. Визуализация завихренности в горизонтальном сечении.

1. Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor. / Samuel Boury, Ilias Sibgatullin, Evgeny Ermanyuk et al. // *Journal of Fluid Mechanics*. *Under review*. <https://arxiv.org/abs/2009.06928>
2. Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3d numerical simulations / C. Brouzet, I. N. Sibgatullin, H. Scolan et al. // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 793. P. 109–131.
3. Sibgatullin I. N., Ermanyuk E. V. Internal and inertial wave attractors: A review // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60. No. 2. P. 284–302.
4. Damping of quasi-two-dimensional internal wave attractors by rigid-wall friction / F. Beckebanze, C. Brouzet, I. N. Sibgatullin, L. R. Maas // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 841. P. 614–635.
5. Sibgatullin I., Tretyakov A., Ermanyuk E. Influence of geometry on energy flow and instability in inertial wave attractors for rotating annular frustum // *Central European Symposium On Thermophysics 2019 (CEST)*. AIP Publishing, 2019.
6. Direct numerical simulation of three-dimensional inertial wave attractors / I. Sibgatullin, E. Ermanyuk, L. Maas et al. // *IEEE Conference Proceedings*. 2017. 17526262.
7. Прямое численное моделирование аттракторов внутренних волн стратифицированной жидкости в трапециевидальной области с колеблющейся вертикальной стенкой / К. Брузе, Т. Доксуа, Е. Ерманюк, М. Крапошин, И. Сибгатуллин // *Труды Института системного программирования РАН (электронный журнал)*. 2014. Т. 26. № 5. С. 117–142.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОАЛЕСЦЕНЦИИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

*В.О. Синицына¹, И.А. Фаттахова¹, К.А. Рыбкин^{1,2},
О.О. Фатталов^{1,2}, Т.П. Любимова^{1,2}*

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

e-mail: daiceens@gmail.com

В работе экспериментально определяется объемное содержание и распределение диаметра парогазовых пузырьков в зависимости от частоты, мощности ультразвукового воздействия и состава жидкости носителя.

Эксперимент проводился с использованием установки, схематично представленной на рисунке, состоящей из сонохимического реактора со сменным источником ультразвука с частотой 28 кГц, 40 кГц, 1,7 МГц и блока оптической регистрации парогазовых пузырьков в проточном режиме.

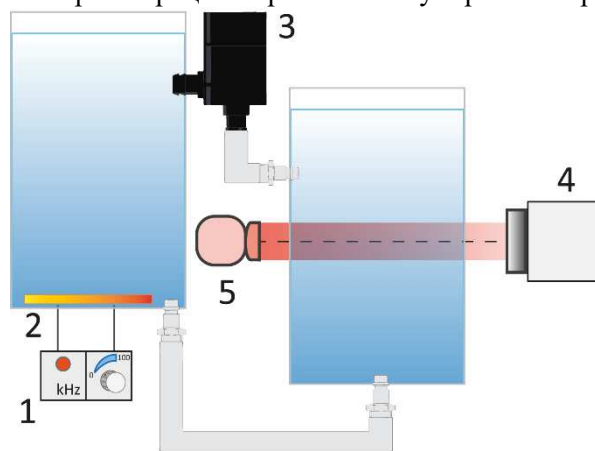


Рис. Экспериментальная установка, используемая в настоящей работе.

Принцип работы установки заключается в следующем. На первом этапе включается водяной насос, создающий непрерывный поток жидкости, затем в сонохимическом реакторе при включении ультразвука образуются кавитационные пузырьки, коалесценция [1] которых приводит к образованию видимых парогазовых пузырьков. Далее пузырьки с потоком жидкости попадают в блок оптической регистрации, где с использованием высокоскоростной камеры (Basler A504к) с телецентрическим макрообъективом происходит подсчет общего количества пузырьков и измерение их диаметра. Для обработки результатов используется программное обеспечение, с помощью которого построены графики зависимости количества парогазовых пузырьков, возникающих в жидкости с течением времени, и гистограммы распределения диаметра пузырьков в зависимости от внешних параметров и от времени включения источника ультразвука. Таким образом, можно оценить особенности коалесценции пузырьков в сонохимическом реакторе в зависимости от различных условий и состава жидкости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

1. Firouzi M., Howes T., Nguyen A. V. A quantitative review of the transition salt concentration for inhibiting bubble coalescence //Advances in colloid and interface science. 2015. Т. 222. С. 305.

ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ, УЧИТЫВАЮЩИЙ МЕХАНИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

И.В. Смолехо

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск
e-mail: ismol@icm.krasn.ru

Для исследования динамических процессов в жидких кристаллах была предложена математическая модель [1], позволяющая описывать механические, температурные и электрические воздействия. На основе уравнений модели в [2] получена и исследована подсистема уравнений второго порядка для касательного напряжения и угловой скорости, учитывающая только механическое воздействие. В настоящей работе подсистема усложняется с целью учета возмущений жидкого кристалла электрическим полем. Электрическое поле возникает за счет появления зарядов на пластинах-обкладках конденсатора, между которыми помещен протяженный горизонтальный жидкокристаллический слой. В правые части уравнений второго порядка входят объемные силы и моменты, обусловленные воздействием электрического поля. Разработан алгоритм численного решения, на первом этапе которого вычисляются объемные силы и моменты на основе уравнений электродинамики с помощью метода прямых, а на втором этапе с использованием конечно-разностной схемы «крест» находятся распределения касательного напряжения, угловой скорости и углов поворота молекул жидкого кристалла. Исследована устойчивость схемы «крест» для некоторого фиксированного шага по времени и доказано, что схема остается устойчивой при выборе меньшего шага. Алгоритм реализован в виде параллельной программы, написанной на языке C++ с применением технологии CUDA для вычислительных систем с графическими ускорителями. Для демонстрации работоспособности алгоритма и программы проведена серия расчетов. Рис. 2 показывает, что со временем происходит переориентации молекул жидкого кристалла в направлении действия электрического поля (рис. 1). При этом в начальный момент времени молекулы имели вертикальную ориентацию.

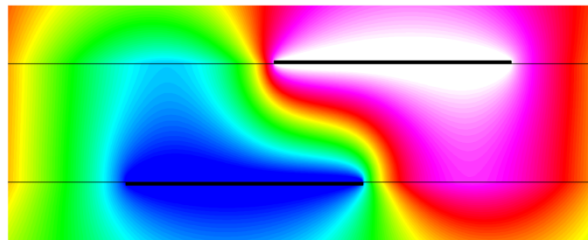


Рис. 1. Линии уровня электрического потенциала в жидкокристаллическом слое и вне слоя.

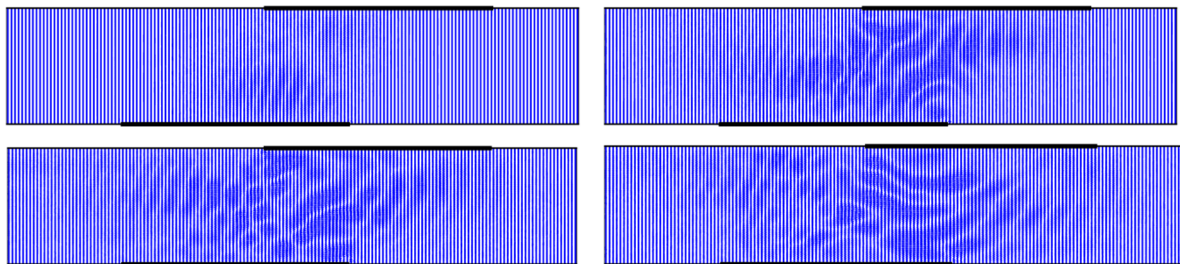


Рис. 2. Распределение углов поворота молекул жидкого кристалла: разные шаги по времени.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

1. Садовский В.М., Садовская О.В., Смолехо И.В. Моделирование динамики жидкого кристалла под действием слабых возмущений // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62. № 1. С. 193–206.

2. Смолехо И.В., Садовская О.В., Садовский В.М. Численное моделирование акустических волн в жидком кристалле с использованием технологии CUDA // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. Спец. вып. 1. С. 87–98.

ЗАДАЧА О СИММЕТРИЧНОМ КАВИТАЦИОННОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА ПРИ НАЛИЧИИ СТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА

А. А. Спасова^{1,2}

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

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

e-mail: anya_spasova@mail.ru

Исследована задача о симметричном кавитационном обтекании круглого цилиндра плоскопараллельным неограниченным потоком идеальной несжимаемой невесомой жидкости при наличии отбора жидкости, который моделируется точечным стоком заданной интенсивности, расположенным на поверхности цилиндра. Течение является стационарным, значения числа кавитации принимаются положительными. Для замыкания кавитационной полости используется схема Эфроса с возвратной струйкой.

Аналитическое решение задачи построено с использованием известного приближенного метода Леви-Чивита. Для определения положения точек отрыва свободных линий тока от цилиндра и получения единственного решения задачи использованы условия Бриллюэна.

Для входящих в общее решение параметров получена замкнутая система уравнений, которая решалась численно. Проведен полный параметрический анализ задачи. Для широкого набора значений безразмерных определяющих параметров рассчитаны форма и размеры каверны, а также найдены расположения точек отрыва струй. Построены зависимости относительных длины и миделя каверн от числа кавитации и безразмерного расхода стока. Проведено сравнение со случаем отсутствия стока. Установлены ограничения на возможные значения безразмерной интенсивности стока.

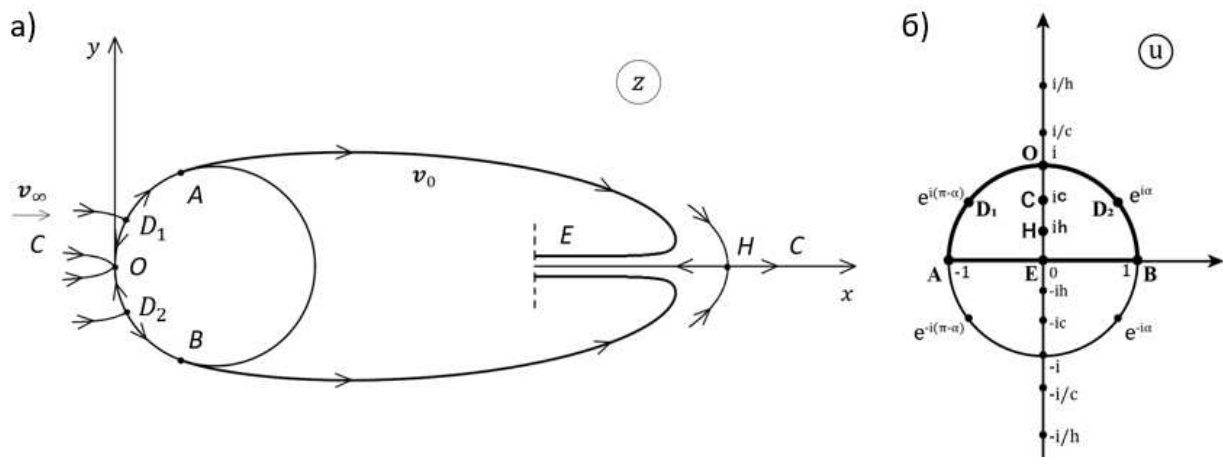


Рис. а) Физическая и б) параметрическая области течения.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЖЕЛЧНЫХ ПРОТОКОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ ИМПЛАНТОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И МИКРОСКОПИИ

Д.И. Спорышева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: dasha.sporysheva@mail.ru

За последние 10 лет распространенность онкологических заболеваний желчевыводящих путей увеличилась примерно в 2 раза. Одним из решений проблемы удаления желчного протока, пораженного опухолью, может стать его замена искусственно созданным биополимерным каркасом (скаффолдом). Существует несколько способов создания биоматериалов для замены тканей и органов (3d биопечать, электроформование и т.д.).

В ходе данной работы было выполнено создание двухслойного волокнистого каркаса общего желчного протока методом электроформования. Основа этого метода заключается в том, что электрическое напряжение прикладывается к раствору полимера, который при помощи дозатора подается через капилляр, а высокое напряжение индуцирует в растворе полимера одноименные электрические заряды, которые, в результате кулоновского электростатического взаимодействия, приводят к вытягиванию раствора полимера в тонкую струю. В качестве материала для воссоздания органа использовались биосовместимые и биоразлагаемые полимеры: поли-L-лактид, хитозан, поликапролактон и диацетат целлюлозы. Производилось сравнение микроструктуры данных материалов с помощью микроскопии. Для оценки распределения волокон использовались методы математического моделирования и статистической механики. Также была произведена оценка механических свойств полученных протоков.

Было показано что, наиболее подходящими для создания каркаса общего желчного протока являются поли-L-лактид и поликапролактон, прочные волокнистые структуры которых создавались методом электроформования. Данный каркас можно эффективно использовать в медицине, а его механические свойства дают результаты сопоставимые с данными о натуральном органе.



Рис. Исследование и создание образца желчного протока: верхний слева рисунок – геометрия желчных протоков и желчного пузыря с камнями; верхний справа рисунок – образец протока, изготовленный с помощью электроформования; нижний слева рисунок – структура волокон, полученная путем микроскопии; нижний справа рисунок – набор образцов в чашках Петри.

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПУЗЫРЬ

О.Г. Сутырин, П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: sutyurin@imec.msu.ru

На основе уравнений Эйлера для совершенного газа с неоднородным распределением плотности и термодинамических характеристик моделируется взаимодействие ударной волны в горючем газе с эллипсоидальным пузырем инертного газа повышенной плотности. Задача решается в двумерной плоской и осесимметричной постановках. Рассмотрены различные числа Маха M падающей волны и отношения длин полуосей пузыря. Для численного моделирования применяется конечно-разностная WENO5-JS схема, дополненная специальным методом аппроксимации уравнения переноса показателя адиабаты газа. Реакция горения газовой смеси моделируется с помощью двухстадийной кинетики Коробейникова-Левина.

Описаны различные режимы воспламенения смеси и показана их существенная зависимость как от интенсивности падающей волны, так и от формы пузыря. При достаточно больших числах Маха падающей волны инициирование горения смеси происходит непосредственно за счет разогрева в ударной волне. Для более слабых скачков воспламенение может происходить при отражении падающей ударной волны от границы раздела газов, незадолго перед фокусировкой (только в осесимметричном случае) и непосредственно при фокусировке падающей волны (рис. 1).

Показано, что форма пузыря также играет важную роль, во многих случаях обеспечивая инициирование горения пузыря более слабой волной, или наоборот, отсутствие воспламенения по сравнению со сферическими пузырями.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00307) и Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2020-806).

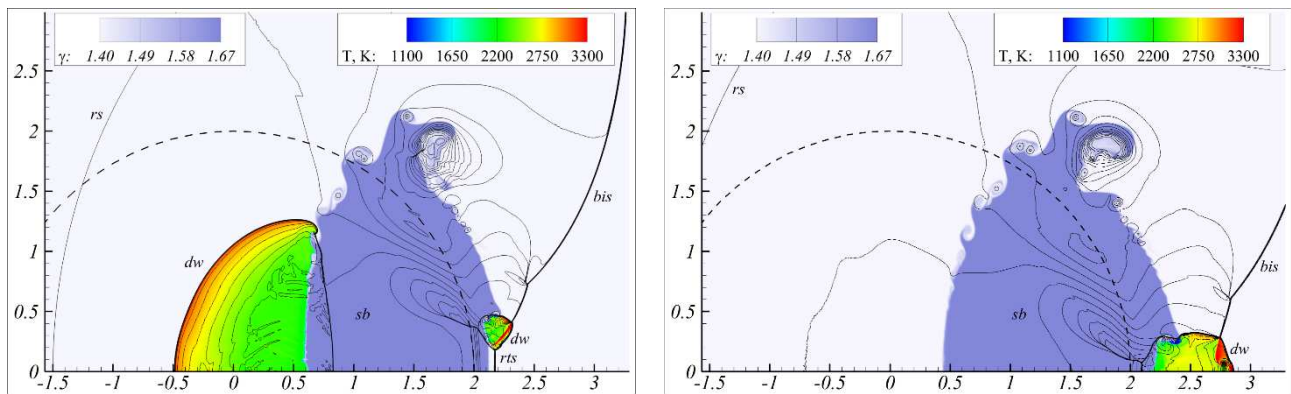


Рис. 1. Воспламенение горючей газовой смеси при отражении и преломлении падающей волны (слева, $M = 2.9$) и при фокусировке поперечных скачков (справа, $M = 2.4$), осесимметричный случай. Изолинии давления, показатель адиабаты газа, цветом показана температура (только $T > 1100\text{K}$). Координаты в сантиметрах, пунктирная линия – исходная граница пузыря. Нижняя граница рисунков – ось симметрии. *bis* – падающая ударная волна (движется слева направо), *rs* – отраженная волна, *rts* – ретранслированная волна, *dw* – детонационная волна, *sb* – ударно-сжатый пузырь.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Д.И. Татаренкова, И.А. Знаменская
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: tatarenkova.darya@yandex.ru

Воздействие импульсного наносекундного разряда на газовый сверхзвуковой поток приводит к кратковременному разрушению стоячих скачков, установившихся отрывов и пр. Данный эффект уже был описан в нескольких наших [1, 2] и других [3] работах. С другой стороны, различные режимы газодинамического течения способны влиять не только на режим протекания разряда, но и на пространственную локализацию импульсного наносекундного разряда.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты изменяющейся локализации импульсного наносекундного объемного разряда (длительность разрядного тока 200 – 500 нс) в зависимости от газодинамического течения. Ранее в одной из работ уже было показано [2], что присутствие диэлектрической вставки, размерами 2 мм × 6 мм × 48 мм, поперек канала, с сечением 24мм × 48мм (вдоль прорастания плазменного листа), в разрядной камере способно концентрировать вблизи себя основной плазменный импульс. Также вставка несет функцию искусственной неоднородности на обтекаемом теле, которая является источником возмущений и косых скачков уплотнения.

Исследования проводились в закрытой однодиафрагменной ударной трубе. В результате разрыва диафрагмы от разницы давлений (гелий 10 атм – воздух 20 торр), образовывалась ударная волна с числом Маха $M = 3.2 - 3.9$, после которой возникал сложный набор переходящих друг в друга течений, начиная от ламинарного сверхзвукового течения гелия (рис. а) до дозвукового воздушного потока (рис. б). Исследования показали, что локализация импульсного энерговклада и формы ударно-волновых конфигураций от него, зависят от фазы потока, в которой импульсно зажигается наносекундный разряд. Это, в свою очередь, дает достаточно полное представление о потоке: виде газа (гелий, воздух), степени развитости турбулентности и т.п.

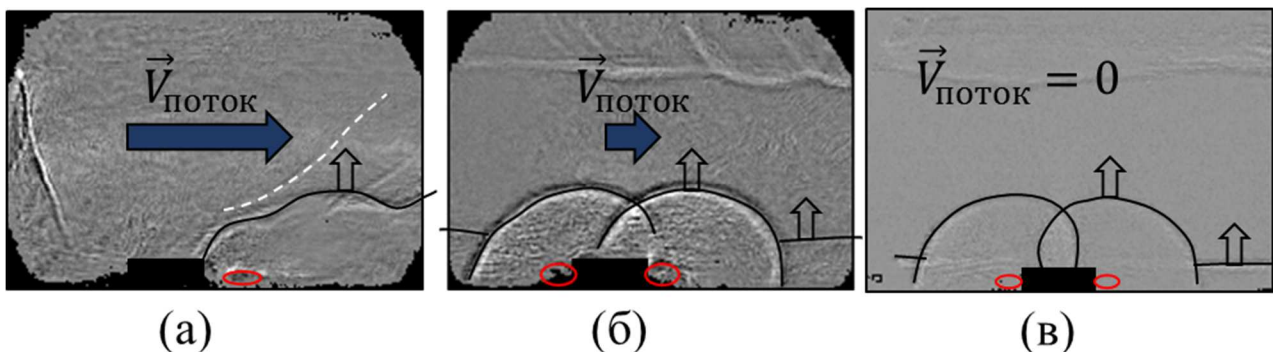


Рис. Распространение ударных волн от импульсного наносекундного разряда в сверхзвуковом потоке (а), дозвуковом (б) потоке и в отсутствии потока (в).

Татаренкова Д.И. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

1. Znamenskaya I.A., Tatarenkova D.I., Ivanov I.E. Localization of a combined pulse discharge within a gas with a rectangular obstacle on the channel wall // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1359. 012121.

2. Znamenskaya I.A., Tatarenkova D.I., Kuli-zade T.A. Nanosecond ionization of an area of flowing around a rectangular ledge by a high-speed flow // Technical Physics Letters. 2020. 46. 1–3.

3. Webb N., Clifford C., Samimy M. Control of oblique shock wave/boundary layer interactions using plasma actuators // Exp Fluids. 2013. 54. 1545.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ МНОГОРЯДНОЙ РЕШЕТКОЙ В ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В.М. Темербеков

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

e-mail: tvm94@inbox.ru

В настоящее время из-за широкого применения высокоэффективных газообразных топлив для различных энергетических установок большой интерес вызывают исследования, связанные с вопросами взрыво- и пожаробезопасности, в частности работы направленные на выявление возможности ослабления и подавления газовой детонации, ее инициирования и взаимодействия с различными препятствиями. Уже существует ряд работ, в которых изучалось подавление детонации, например, инертными частицами [1]. В настоящей работе для ослабления детонации используется многорядная решетка, состоящая из прутьев круглого сечения, расположенных в шахматном порядке.

Задача решалась в плоской симметричной постановке (рис. 1). В качестве решателя использован программный комплекс ANSYS Fluent. Используемая математическая модель была ранее протестирована на задаче об инициировании наклонной детонации [2]. Кинетическая схема, включающая одну брутто-реакцию горения водорода в воздухе, была верифицирована по экспериментальным данным о временах задержки воспламенения и скорости распространения детонационной волны при различных условиях [3].

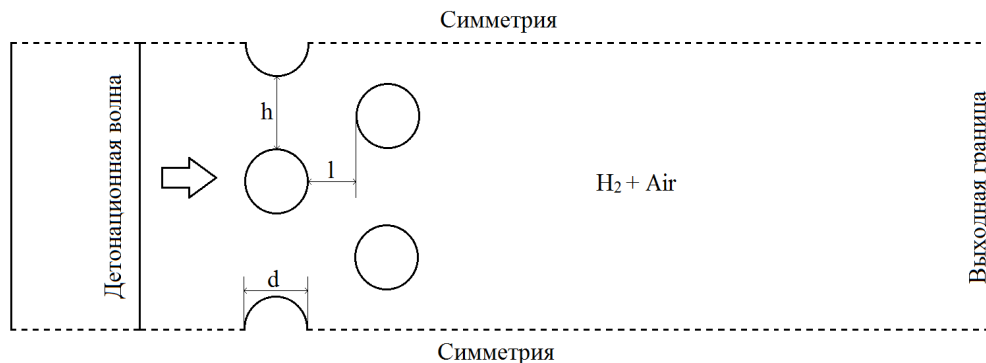


Рисунок 1. Схема моделируемой области.

В результате расчета задачи о взаимодействии детонационной волны с цилиндрической решеткой выявлено, что используемая математическая модель, а в частности кинетический механизм химических реакций, учитывает изменение кинетики водорода в области третьего предела воспламенения водорода в воздухе. Увеличение диаметра цилиндров, при неизменной пропускной способности, приводит уменьшению дефицита скорости ДВ несмотря на возрастание длины участка канала, в котором расположено препятствие. Уменьшение геометрических параметров преграды до размеров, сопоставимых с размером детонационной ячейки смеси, приводит к возрастанию ее эффективности для ослабления детонации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90178.

1. Tropin, D.A. and Fedorov A.V. Effect of inert micro- and nanoparticles on the parameters of detonation waves in silane/hydrogen - air mixtures // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2019. Vol. 55, No 2. P. 230 - 236.

2. Bedarev I. A., Temerbekov V. M., Fedorov A. V. Simulating the regimes of oblique detonation waves arising at detonation initiation by a small-diameter projectile // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26, No 1. P. 59 – 68.

3. I.A. Bedarev, K.V. Rylova, and A.V. Fedorov. Application of Detailed and Reduced Kinetic Schemes for the Description of Detonation of Diluted Hydrogen–Air Mixtures// Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2015. Vol. 51, No. 5, P. 528–539.

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В МЕХАНИКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

В.В. Терауд¹, Е.С. Шевченко²

^{1,2} НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: ldrnww@gmail.com

Работа металлических конструкций при повышенных температурах в условиях растяжения иногда приводит к потере устойчивости. Изучение этого процесса при повышенных температурах представляет собой большой интерес, особенно поиск момент локализации деформаций. Известные на сегодняшний день критерии появления локализации деформаций в образце можно разделить на четыре группы: три детерминированных критерия - максимальной силы [1, 2], деформационные [3] и временные критерии [4], а также критерии, основанные на глубоком машинном обучении [5] и др.

Экспериментальные испытания проводились при постоянной температуре 400°C с постоянной растягивающей нагрузкой в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Разработанный бесконтактный метод измерения [6] использован для измерения параметров образца. Полученные механические характеристики моделируются градиентным бустингом и нейронными сетями по фотографиям процесса деформирования. Промоделированы: длина образца, деформация образца и время локализации деформаций.

Моделирование методом градиентного бустинга показало, что алгоритм потерял обобщающую способность уже на уменьшенном наборе данных, поэтому в дальнейшем не рассматривался. Пример зависимости $p(t)$ для экспериментов № 13 приведен на рисунке слева.

Нейросетевой анализ продольной деформации дал общую ошибку ~10 %. Для дальнейшего снижения ошибки была построена линейная регрессия на прогнозах трех нейронных сетей с наилучшими наборами гиперпараметров. Это позволило снизить ошибку моделирования до 3,6 % на всей выборке. Пример полученного результата для эксперимента №17 приведен на рисунке справа.

Времена локализации моделировались искусственной нейросетью для размерного и безразмерного значения. Использовались нейросеть с четырьмя выходами и четыре отдельных нейросети с одним выходом. Последняя показала лучший результат – 1.5 % на всей выборке данных.

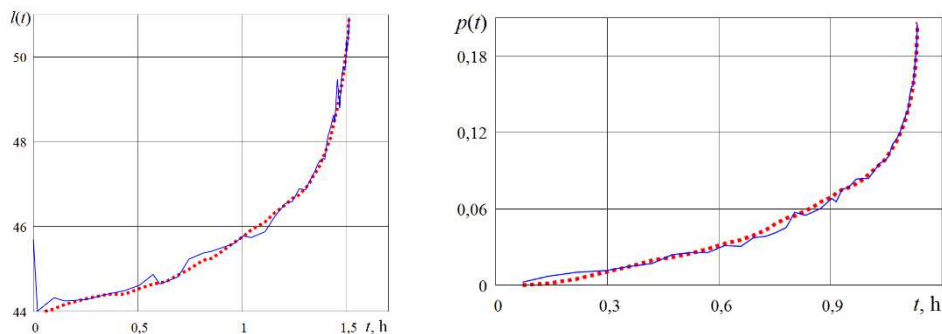


Рис. Значения зависимостей $p(t)$ для эксперимента № 13 (слева) и моделирование методом градиентного бустинга. Значения $p(t)$ для эксперимента № 17 (справа), полученная при помощи множественной линейной регрессии

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ (проект №19-19-00062).

1. Hora P, Tong L, Berisha B. Modified maximum force criterion, a model for the theoretical prediction of forming limit curves. *Int. J. Mater. Form.*, 2013; 6: 267-279. <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1084-1>.
2. Aretz H. An extension of Hill's localized necking model. *Int. J. Eng. Sci.*, 2010; 48:312-331.
3. Martínez AJ, Vallengano C, Morales D, Garc-Lomas FJ. On the Experimental Detection of Necking in Stretch - Bending Tests. *AIP Conference Proceedings* 1181, 2009; 79: 500-508. <https://doi.org/10.1063/1.3273668>.
4. Wilshire B, Burt H. Long-term creep design data for forged ICr-IMo-0,25V steel. *Strength, Fracture and Complexity*, 2006; 4: 65-73.
5. Applications of Deep Learning for Computer Vision. Retrieved from <https://machinelearningmastery.com/applications-of-deep-learning-for-computer-vision>; 3 May 2019.
6. Teraud WV. An experimental research of high temperature strain localization and a method for non-touch measurements at a high temperature experiments. In: *Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. Structural Integrity*. Springer, Cham, 2018; 5: 124-130.

ТЕПЛООБМЕН В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

А.И. Решмин¹, В.В. Трифонов¹, С.Х. Тепловодский¹

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

e-mail: trifonov@imec.msu.ru

Проведены численные исследования течения в кольцевом канале переменного сечения. Течение предполагалось безотрывным, поэтому рассматривались только небольшие углы наклона стенок канала. Для чисел Рейнольдса в диапазоне 3000-10000 рассчитаны профили скорости, энергии турбулентности, напряжений Рейнольдса и определяемые ими характеристики турбулентного теплообмена. Расчеты показали сильное влияние угла раскрытия кольцевого канала на турбулентные характеристики потока. Увеличение интенсивности турбулентности в случае подвода тепла к стенке приводит к увеличению характеристик теплообмена. При использовании такого канала в теплообменном аппарате можно, не применяя искусственную турбулизацию потока, увеличить число Нуссельта и коэффициента аналогии Рейнольдса по сравнению с каналом постоянного сечения при тех же числах Рейнольдса. Расчеты проведены с применением трёхпараметрической дифференциальной модели турбулентности [1], дополненной уравнениями для турбулентного переноса тепла, проведено численное исследование течения и теплообмена в кольцевых каналах с различной степенью расширения. В качестве теплоносителя рассматривался воздух при нормальных условиях.

Показано, что в кольцевом расширяющемся канале при всех рассмотренных изменениях угла раскрытия и чисел Рейнольдса основные характеристики теплообмена – число Нуссельта и коэффициент аналогии Рейнольдса – оказываются выше, чем в канале постоянного сечения при том же числе Рейнольдса. Это превышение возрастает с увеличением угла раскрытия.

Интенсификация теплообмена в расширяющемся кольцевом канале достигается без заметного роста коэффициента трения. Это является принципиальным отличием рассмотренного способа интенсификации теплообмена от многих известных способов, где увеличение теплоотдачи достигается ценой значительного роста гидравлических потерь.

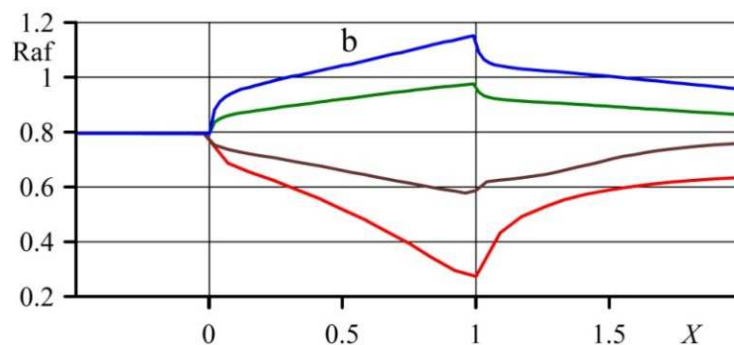


Рис. Изменение фактора аналогии Рейнольдса Raf воздушного потока по длине $X = x/L_d$ канала в зависимости от угла раскрытия α при $Re = 5000$. α : синий 1° , зеленый 0.5° , коричневый -0.5° , красный -1° .

1. Lushchik V. G., Pavel'ev A. A., Yakubenko A. E. "Three-parameter model of shear turbulence: heat transfer calculations," Fluid Dyn 21, 200–211, 1986.

МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ВОЛОКНАХ БИОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

П.М. Тюбаева^{1,2}, А.К. Зыкова^{1,2}, А.А. Ольхов^{1,2}, А.А. Попов^{1,2}, Е.С. Мороков²

¹Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва

²Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

e-mail: polina-tyubaeva@yandex.ru

В последние годы наноконпозиционные волоконные материалы с ценными функциональными свойствами находят широкое применение в различных областях, в том числе: материалы для фотоники, генной терапии, биомедицины [1]. Большой научный и практический интерес представляет исследование структурных особенностей биополимерных волокон, позволяющих варьировать их важнейшие свойства и эксплуатационные характеристики. Одним из наиболее перспективных методов получения материалов с контролируемой морфологией и геометрией волокон в слое материала является электроформование [2]. Целью данной работы было рассмотрение особенностей структуры ультратонких волокон на основе поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ) и установление деформационных свойств полимерных волокон.

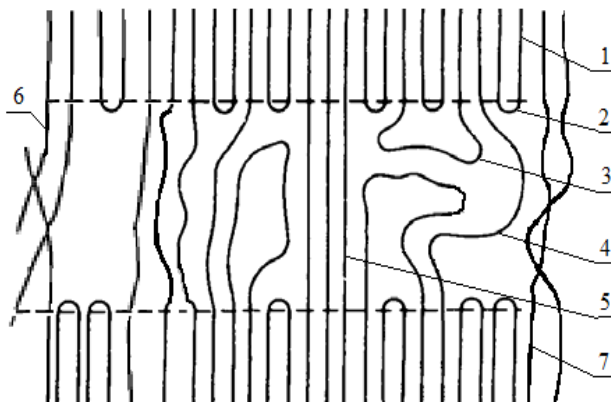


Рис. Организация макромолекул ПГБ, ориентированных в волокнах материала, где: 1 – кристаллические области; 2 – регулярная складка цепи; 3 – нерегулярная складка цепи (свободная петля); 4 – проходные молекулы; 5 – наиболее короткие, вытянутые и напряженные проходные молекулы; 6 – межфибриллярные проходные цепи; 7 – межфибриллярные структуры.

В результате серии экспериментов в различных средах (вода, воздух, многоатомные спирты), моделирующих условия, в которых могут оказываться волоконные тканеинженерные конструкции в период эксплуатации, были установлены ключевые закономерности, позволяющие детально описать деформационные процессы, как в материале, так и в отдельных волокнах.

Было установлено, что деформационные свойства волокон на основе ПГБ в большой степени зависят от организации надмолекулярной структуры. Выработка волокон методом электроформования способствует формированию локальных напряжений в макромолекулах полимера [3]. Воздействие на эти области за счет предварительной обработки или помещения материала в жидкие среды ведет к реорганизации надмолекулярной структуры и снятию этих напряжений, что обуславливает существенный рост всех физико-механических

характеристик.

Полученные данные позволяют моделировать надмолекулярную структуру волокон на основе ПГБ для медицинских изделий таким образом, чтобы обеспечить заданные физико-механические свойства, а также с высокой точностью предсказать характер деформирования и разрушения материала.

1. Ding J., Zhang J., Li J., Li D., Xiao C., Xiao H., Yang H., Chen X. Electrospun polymer biomaterials // Progress in Polymer Science, 2019, 90, pp. 1-34.

2. Филатов Ю. Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). М.: Нефть и Газ, 1997.

3. Tyubaeva P., Zykova A., Podmasteriev V., Olkhov A., Popov A., Iordanski A. The investigation of the structure and properties of ozone-sterilized nonwoven biopolymer materials for medical application // Polymers, V. 13, № 8, 2021, Номер статьи 1268.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОНТАННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

И. С. Уткин, А. А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В вулканически активных зонах часто наблюдаются потоки горячего водяного пара и углекислого газа через поверхность Земли в атмосферу, а также присутствуют озера с кипящей водой и горячие источники. Источником горячего газа является магматический расплав, залегающий на глубине десятков километров. При остывании от магматического расплава отделяются большие объемы вулканического газа, который устремляется к поверхности по проницаемым вмещающим породам. Выход газа на поверхность обычно локализован в трещинах и кратерах, имеющих небольшой размер по сравнению с характерными масштабами магматических очагов.

Магматический расплав прогревает окружающие породы, что приводит к изменению реологических свойств пород и их вязкопластической компакссии, то есть к сжатию порового пространства. При этом проницаемость пород существенно уменьшается, что осложняет фильтрацию вулканического газа. Определение механизма переноса газа к поверхности и локализации течения в пористой среде является актуальной задачей, поскольку вулканический газ может содержать в растворенном виде примеси ценных металлов, и гидротермальная активность часто сопряжена с процессами рудообразования.

Работа посвящена исследованию течений вулканического газа в вязкоупругих вмещающих породах. Представлена математическая модель течения жидкости в деформируемой пористой среде, основанная на уравнениях механики многофазных сред. С помощью численной реализации предложенной модели проведено моделирование переноса магматического газа в верхней коре Земли. Учитывается зависимость вязкоупругих свойств горных пород от температуры, пластические деформации твердой матрицы при высоком поровом давлении. Используются реалистичные свойства флюидов в широком диапазоне глубин.

Исследовано влияние учета пластических деформаций на формирование высокопроницаемых каналов в пластической зоне и взаимодействие этих каналов с конвекцией в хрупкой зоне. Показано, что компакция вызывает локализацию фильтрационного течения и накопление вулканического газа в областях с высокой пористостью – линзах. Показано, что перенос газа происходит в основном через верхнюю часть линз, что приводит к восходящему потоку гидротермальной конвекции, всегда находящемуся наверху каждой линзы. Другие потоки газа между линзами связаны с конвекцией грунтовых вод. Моделирование показывает, что линзы можно отслеживать, измеряя определенные параметры на поверхности.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ИЗГИБ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЕННОЙ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА С УЧЕТОМ ТЕРМОДИФФУЗИИ

А.В. Земсков^{1,2}, Г.М. Файкин¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: egorc16@mail.ru

В данной работе на примере нестационарного изгиба свободно опертой балки исследуется взаимосвязь механического, температурного и диффузионного полей.

Рассматриваемый вопрос очень важен при расчете корпусов авиадвигателей, фюзеляжей самолётов и ракет. Правильное понимание и применение законов диффузии, теории упругости и законов, описывающих температурное воздействие, позволяет избежать непредсказуемых и нежелательных изменений в авиаконструкциях, происходящих под влиянием нестационарных нагрузок различного характера.

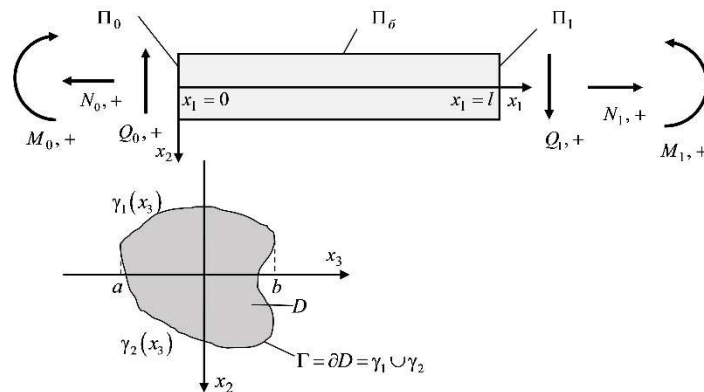


Рисунок.

Для постановки задачи используется модель связанной термоупругой диффузии для однородного ортотропного многокомпонентного континуума [1-4]. Модель нестационарного изгиба для упругодиффузионной балки Бернулли-Эйлера строится с помощью вариационного принципа Даламбера [3-5]. При этом предполагается, что:

1. Поперечные прогибы считаются малыми. Сечения, перпендикулярные к оси балки до деформации, остаются плоскими и после деформации (гипотеза плоских сечений);
2. Поперечные сечения после деформации остаются нормальными к изогнутой оси балки (гипотеза Бернулли-Эйлера);
3. Боковая поверхность балки свободна от нагрузок и тепломассоперенос на ней отсутствует, что позволяет считать балку несжимаемой в поперечном направлении.

Для решения полученной задачи, используется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье по пространственной координате. Обращение преобразования Лапласа осуществляется аналитически с помощью вычетов и таблиц операционного исчисления. Для расчетного примера, иллюстрирующего взаимодействие физических полей, рассматривается балка прямоугольного сечения, выполненная из трехкомпонентного материала, состоящего из алюминия (93,5%), меди (4,5%) и цинка (2%).

1. Aouadi M., Miranville A. Quasi-stability and global attractor in nonlinear thermoelastic diffusion plate with memory // Evolution equations and control theory. 2015. Vol. 4. No 3. P. 241-263.

2. Bhattacharya D., Kanoria M. The influence of two temperature generalized thermoelastic diffusion inside a spherical shell // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR). - 2014. - Vol. 2, Is. 5. - P. 151-159.

3. Tarlakovskii D.V., Zemskov A.V. An Elastodiffusive Orthotropic Euler-Bernoulli Beam with Considering Diffusion Flux Relaxation // Math. Comput. Appl. – 2019. – Vol. 24, Is. 1, 23; doi:10.3390/mca24010023.

4. Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V. Unsteady Vibration Model of the Euler-Bernoulli Beam Taking into Account Diffusion // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1158. – 042043 doi:10.1088/1742-6596/1158/4/042043.

5. Le, K.C., Vibrations of shells and rods, Springer Verlag, Berlin, 1999.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ И ПАВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

О.О. Фатталов¹, К.А. Рыбкин¹, Т.П. Любимова^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

e-mail: fattalov@mail.com

Под воздействием ультразвука в жидкости могут образовываться инерционные и неинерционные (неактивные) кавитационные пузырьки. Активность образования пузырьков за счет процессов кавитации и коалесценции зависит от многих факторов, в результате могут наблюдаться как коллапс парогазовых кавитационных пузырьков в жидкости, так и их коалесценция и длительное существование относительно крупных пузырьков [1,2].

Проведено экспериментальное исследование активности кавитационных процессов и интенсивности коалесценции парогазовых пузырьков, возникающих в объеме жидкости при наличии ультразвукового (УЗ) воздействия в растворе соли NaCl и при различных концентрациях sodium dodecyl sulfate (SDS). Процесс образования и дрейфа пузырьков фиксировался с помощью скоростной камеры в плоскости кюветы освещенной лазерным ножом. Показано, что добавление ПАВ в водный раствор соли NaCl приводит к частичному ингибированию процесса коалесценции пузырьков миллиметрового диаметра и смене режима дегазации жидкости при наличии УЗ воздействия. Максимальная активность кавитационных процессов и образования парогазовых пузырьков наблюдалась при наличии соли и низкой концентрации SDS. Таким образом наличие ПАВ в водном растворе соли 0,1 М NaCl приводит к изменению динамики роста пузырькового ансамбля, так как мелкие пузырьки не способны всплывать на поверхность, ввиду преобладания вязких и вибрационных сил над выталкивающей силой.

На рис. представлены изображения, полученные в результате объединения 500 кадров для чистой воды и при наличии 0,1 М NaCl и низкой концентрации SDS равной 0,05 мМ.

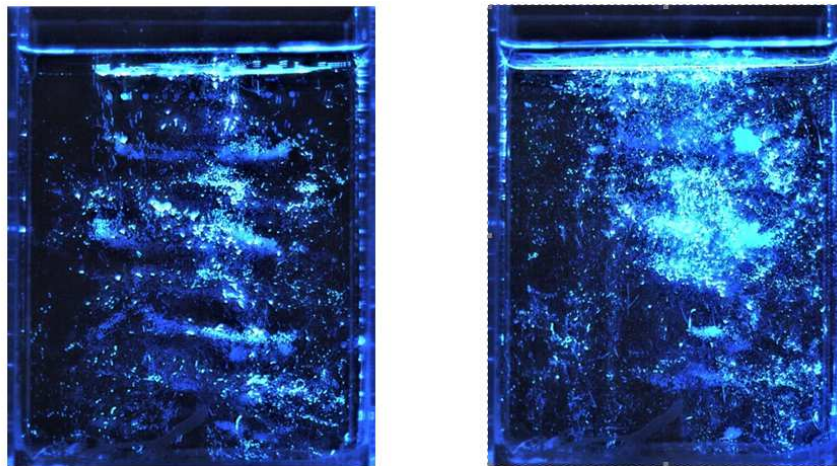


Рис. Фотография, полученная объединением 500 кадров для чистой воды слева, справа - при наличии 0,1 М NaCl и низкой концентрации SDS равной 0,05 мМ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90138.

1. On stability of time marching in numerical solutions of rayleigh-pleisset equation for ultrasonic cavitation / Wah Yen Tey, Habib Alehossein, Zonyi Qin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science / IOP Publishing. – Vol. 463. – 2020. – P. 012117.

2. Controlled multibubble surface cavitation / Nicolas Bremond, Manish Arora, Claus-Dieter Ohl, Detlef Lohse // Physical review letters. – 2006. – Vol. 96, no. 22. – P. 224501.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ЕДИНИЧНОГО ПАРОГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

*И.А. Фаттахова¹, В.О. Синуцына¹, К.А. Рыбкин^{1,2},
О.О. Фатталов^{1,2}, Т.П. Любимова^{1,2}*

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

e-mail: irina.fattahova2017@yandex.ru

В работе экспериментально исследуется процесс коалесценции парогазовых пузырьков, возникающих при воздействии ультразвука (УЗ) на дистиллированную воду и водный раствор соли NaCl различной концентрации на поверхности акрилового стекла. Обсуждается зависимость скорости роста диаметра пузырька и средний диаметр его отрыва от поверхности акрилового стекла в зависимости от состава жидкости при УЗ воздействии.

Эксперимент проводился в ячейке размером $110 \times 116 \times 160$ мм³, имеющей форму параллелепипеда. Для регистрации пузырьков использовалась высокоскоростная камера (Basler A504kc) с телецентрическим макрообъективом, которая фокусировалась на стенку кюветы. Для освещения использовался коллимированный источник контрольного света. В качестве исследуемых жидкостей использовались дистиллированная вода и растворы NaCl с концентрациями 0,1 моль/л, 0,2 моль/л, 0,3 моль/л. На рисунках представлены экспериментальная установка и фотографии пузырьков, полученные в результате эксперимента.

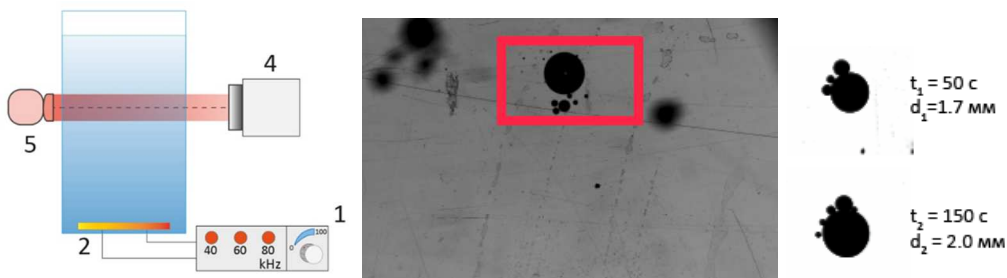


Рис. Слева показана экспериментальная установка. В центре - фотография парогазового пузырька, возникшего под действием УЗ на поверхности акрилового стекла в воде. Справа – рост единичного пузырька в воде с течением времени после программной обработки изображений.

Была проведена серия экспериментов, в которых кавитационные пузырьки активно коалесцировали в объеме жидкости и в результате дрейфа прикреплялись к поверхности акрилового стекла. [1] Таким образом, в результате коалесценции образуется крупный одиночный парогазовый пузырек, который через некоторое время всплывает под действием силы Архимеда. Средний диаметр пузырька при отрыве в дистиллированной воде составил 2.3 ± 0.3 мм.

В результате экспериментального исследования роста парогазового пузырька в воде и при различных концентрациях NaCl было выявлено, что динамика роста пузырька в воде и в растворе соли с концентрацией 0.1 моль/л и 0.2 моль/л практически одинаковая, а при концентрации соли 0.3 моль/л ситуация значительно меняется вследствие ингибирования коалесценции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

1. Fattalov, O., Lyubimova, T., Rybkin, K., Kuchinskiy, M. Experimental Study of the Processes of Formation, Drift and Levitation of Vapor–Gas Bubbles in Water //Microgravity Science and Technology. 2021. Т. 33. №. 2. С. 1-7.

ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ С ПОКРЫТЫМИ ОБОЛОЧКОЙ ПУЗЫРЬКАМИ

Ю.В. Федоров

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

e-mail: kopperfildd@ya.ru

Покрытые вязкоупругой оболочкой пузырьки встречаются во многих областях. Но основное применение они нашли в биомедицине, где используются в качестве контрастных веществ для ультразвуковой диагностики [1].

В рамках данной работы получено модифицированное уравнение Релея-Ламба, учитывающее радиальные колебания пузырька газа, покрытого вязкоупругой оболочкой и находящегося в вязкоупругой среде. Учет вязкоупругости оболочки и несущей жидкости проводится на основе реологических моделей Кельвина-Фойгта и Максвелла. Для случая малых возмущений найдено дисперсионное уравнение, учитывающее межфазный теплообмен между газом, вязкоупругой оболочкой и несущей средой. Проиллюстрировано влияние оболочки пузырьков, упругости несущей фазы на динамику акустических волн. В частности, на приведенном рисунке представлено влияние упругости несущей среды, оболочки пузырьков на зависимости фазовой скорости от частоты возмущений для смеси полидиметилсилоксана (PDMS RTV-615) с воздушными пузырьками. Дано сравнение теории с экспериментальными данными [2]. Параметры расчета и математическая модель представлены в работах [3, 4]. Кривая 1 построена без учета упругости несущей среды, кривая 2 – с учетом упругости несущей среды, кривая 3 – с учетом упругости несущей среды и при наличии вязкоупругой оболочки пузырьков. Как видно из рисунка, учет упругости несущей фазы приводит к сдвигу резонансной частоты возмущений (кривая 2), что также хорошо подтверждается экспериментальными данными. Дополнительный учет вязкоупругой оболочки приводит к еще большему значению резонансной частоты (кривая 3). Наличие оболочки пузырьков может привести также к исчезновению полосы непрозрачности у фазовой скорости (фазовая скорость не превысит скорость звука в несущей фазе во всем диапазоне частот). Это связано с тем, что оболочка пузырьков сдерживает пульсации включений. Пузырьки ведут себя как твердые частицы и, в связи с этим, происходит меньшее рассеяние акустической волны по сравнению с обычными пузырьковыми средами.

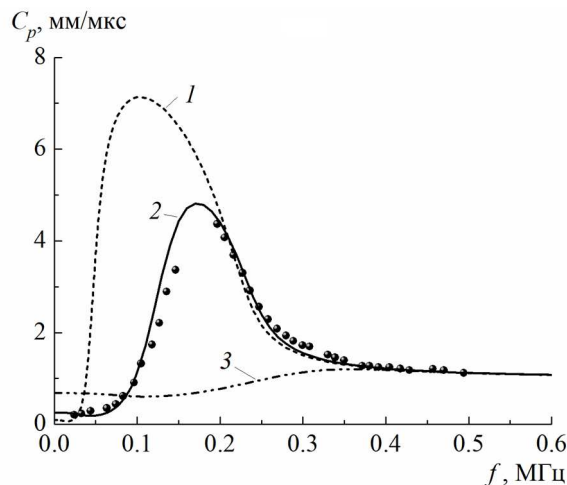


Рис. Зависимость фазовой скорости от частоты возмущений для полидиметилсилоксана с пузырьками.

1. Goldberg B.B., Raichlen J.S., Editors F.F. Ultrasound contrast agents. Basic principles and clinical applications. Martin Dunitz, 2001.

2. Leroy V., Strybulevich A., Page J.H., Scanlon M. G. Influence of positional correlations on the propagation of waves in a complex medium with polydisperse resonant scatterers // Physical Review E. 2011. V. 83. P. 046605.

3. Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Волновая динамика покрытых оболочкой включений в вязкоупругой среде // ПМТФ. 2020. Т. 61. № 4. С. 22-30.

4. Gubaidullin D.A., Fedorov Yu.V. Acoustics of a viscoelastic medium with encapsulated bubbles // Journal of Hydrodynamics. 2021. V. 33. № 1. P. 55-62.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕМБРАНЫ С ЖЁСТКИМ УДАРНИКОМ ПРИ УЧЕТЕ СИЛ АДГЕЗИОННОГО ДАВЛЕНИЯ

А.С. Оконечнико ¹, Г.В. Федотенков ^{1,2}, Е.С. Феоктистова ¹

¹Московский авиационный институт, Москва

²НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: oas.mai@mail.ru, greghome@mail.ru, feoktistovaes@mai.ru

В рамках исследования рассматривается второй этап нестационарного воздействия ударника, представленного жёстким штампом, на бесконечную мембрану. В работе рассмотрен момент механического контакта исследуемых тел. Ранее в работах [1], [2], [3] был рассмотрен начальный этап взаимодействия мембраны и жёсткого штампа с учетом влияния адгезионного давления – до момента механического контакта тел.

В работе использована модель Можи для описания сил адгезионного притяжения, возникающего между исследуемыми телами. Описание данной модели основывается на гипотезе возникновения адгезионного притяжения между телами до момента механического контакта, когда между объектами преодолевается зазор равный критическому значению h_{\max} ; предполагается, что в момент соприкосновения исследуемых тел, мембрана подвержена деформации не только в зоне контакта со штампом, но и в некоторой области вне зоны контакта, которая называется областью адгезионного притяжения.

В рамках постановки задачи перемещения границ мембраны представлены как свертка функции Грина и поверхностного давления, возникающего вследствие контакта штампа и мембраны, а также влияния адгезии. В момент контакта предполагается наличие только нормальных контактных напряжений под штампом, для определения которых были составлены и проанализированы интегральные уравнения. Данные интегральные уравнения представлены в матричном виде, что упрощает нахождение решения. На данный момент ведется разработка алгоритмов определения контактных напряжений и их реализация на ЭВМ.

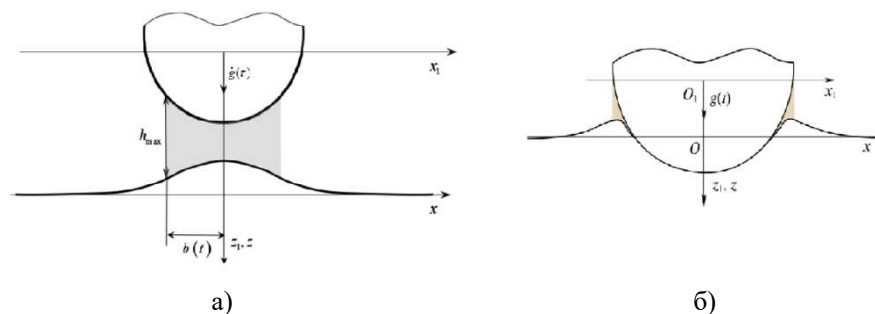


Рис. 1. Взаимодействие ударника и мембраны; а) – до момента механического контакта, б) – в момент механического контакта

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-01-00127а, 20-58-04012 Бел_мол_а).

1. A. S. Okonechnikov, D. V. Tarlakovsky, and G. V. Fedotenko Transient Interaction of Rigid Indenter with Elastic Half-plane with Adhesive Force //ISSN 1995-0802, Lobachevskii Journal of Mathematics, 2019, Vol. 40, No. 4, pp. 489–498. <https://doi.org/10.1134/S1995080219040115>

2. Оконечников А.С., Пашков Я.В., Федотенков Г.В. Нестационарное взаимодействие мембраны и штампа под действием адгезионных сил // Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова– Вятчи, 16 – 20 марта 2020г., Т.2.–С.101-[3] Оконечников А.С., Козел А.Г. Нестационарная контактная задача для штампа и упругой полуплоскости при учете силы адгезионного взаимодействия //XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов, 19-24 августа 2019г. Уфа, – С.253.

КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ВОДЫ

О.А. Симонов,¹ Л.Н. Филимонова²

¹ Тюменский Научный Центр СО РАН, Тюмень

² Тюменский филиал ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень

При проектировании и сооружении зданий, скважин, трубопроводов, а также других объектов, постоянно находящихся в условиях отрицательных температур, необходимо учитывать промерзание и протаивание грунтов. В тёплый период поверхностный слой грунта, подстилаемый многолетнемерзлыми породами, чаще всего высокопористый песок, оттаивает и образует переувлажненный слой породы. Для стабилизации грунта используют термостабилизаторы – охлаждающие устройства необходимые для повышения несущей способности грунта путём охлаждения и замораживания [1]. При охлаждении протаявшего слоя термостабилизатором, в пористой среде возникают градиенты температуры, приводящие к конвекции. В большинстве случаев, при моделировании конвективных течений не учитывается наличие максимума плотности воды (в окрестности 4° С), но при охлаждении грунта до 0°С, в высоко проницаемых грунтах этим явлением пренебрегать нельзя.

Цель данной работы – оценить влияние конвективного теплопереноса на процесс охлаждения термостабилизатором насыщенной водой пористой среды при учете явления инверсии плотности и продемонстрировать различия с расчетами, в которых не учитывается данное явление.

Для этого численно моделируется процесс охлаждения водонасыщенной пористой среды в теплоизолированном сосуде с вертикальным охлаждающим элементом. Проницаемость пористой среды характерна для высокопроницаемых среднезернистых песков и равняется $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ [2]. Расчеты выполнены для трёх различных случаев: в первом, расчёты без учёта конвекции; второй, без учета наличия максимума плотности воды и третий, расчёты с учетом максимума плотности воды. На рис. представлено изменение средних температур для этих случаев.

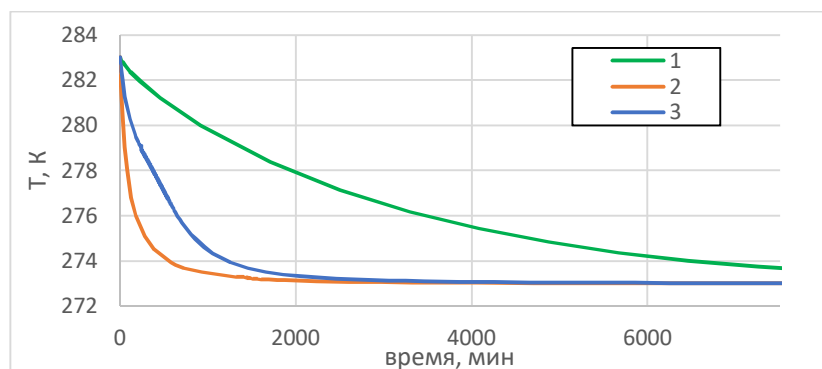


Рис. Зависимость средней температуры от времени для трёх различных случаев: 1 - не учитывается конвекция; 2 - не учитывается инверсия плотности; 3 - учитывается инверсия плотности.

Конвективное течение значительно влияет на скорость остывания воды в поровом объёме (кривые 1 и 3). Причём, чем выше проницаемость водонасыщенной пористой среды, тем остывание за счёт конвекции происходит быстрее. В нашем случае расчётный объём остывает до температуры 273,5К за 1 сутки 4 часа, а без учета движения жидкости остывание происходит за 5 суток 14 часов (медленнее в 4,8 раза). При этом, если не учитывать максимум плотности воды (кривая 2), то средние скорости значительно выше, течение не замедляется, остывание в объёме происходит быстрее, за 18 часов.

Из проведенного исследования следует, что при решении теплотехнических задач в системах, содержащих высокопроницаемые влагонасыщенные грунты, необходимо учитывать конвективные течения, и предпочтительнее использовать модели воды, учитывающие её максимум плотности, так как ошибка при определении времен остывания может быть значительна (в наших расчётах в 1,5 раза).

1. Реховская Е.О. Применение термостабилизаторов грунта на магистральных трубопроводах / Реховская Е.О., Макарова А.С.// Молодой ученый. – 2016. – №19. – С. 207-210.

2. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши / Р. Де Уист Том I. - Москва: Мир, 1969. – 312 с.

БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ «АОРТА – ШУНТ – ЛЕГОЧНАЯ АРТЕРИЯ» НА ЛОКАЛЬНУЮ ГЕМОДИНАМИКУ

А.Р. Хайрулин¹, А.Г. Кучумов¹, М.И. Шмурак¹, А.А. Породииков²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии им. С.Г. Суханова, Пермь

e-mail: kychymov@inbox.ru, s.xairulin@mail.ru

Показатели детской смертности у детей с врожденным пороком сердца неуклонно растут в России. Обструктивные поражения выводного тракта правого желудочка, изолированные или сочетающиеся с другими врожденными пороками сердца, составляют 25–30% врожденных аномалий сердца [1]. Хирургическое вмешательство является основным методом лечения нарушений развития сердечно – сосудистых структур при врожденных пороках сердца. Прорывным решением в хирургическом лечении цианотических врожденных пороков сердца оказалось создание модифицированного шунта Blalock–Taussig. Однако, хирурги встречаются с множеством факторов, влияющих на успешность операции, для анализа которых необходимо математическое моделирование и методы биомеханики [2]. В данной работе рассмотрена модель течения крови системы «аорта – шунт – легочная артерия» реального пациента с учетом взаимодействия «жидкость – твердое тело». Было проанализировано влияние анизотропной гиперупругой (Хольцапфеля–Гассера–Огдена) и изотропной гиперупругой моделей материалов аорты и легочной артерии, а также изотропной линейно – упругой и изотропной гиперупругой моделей материалов шунтов на значения гемодинамических параметров. Было выявлено, что модели материалов, как аорты и легочной артерии, так и шунтов имеют незначительное влияние на характер распределения гемодинамических параметров. Однако количественные значения данных параметров различаются. Показано, что модели материалов имеют незначительное влияние на объёмный расход через поперечное сечение шунта. Гемодинамически значимым является лишь местоположение шунта

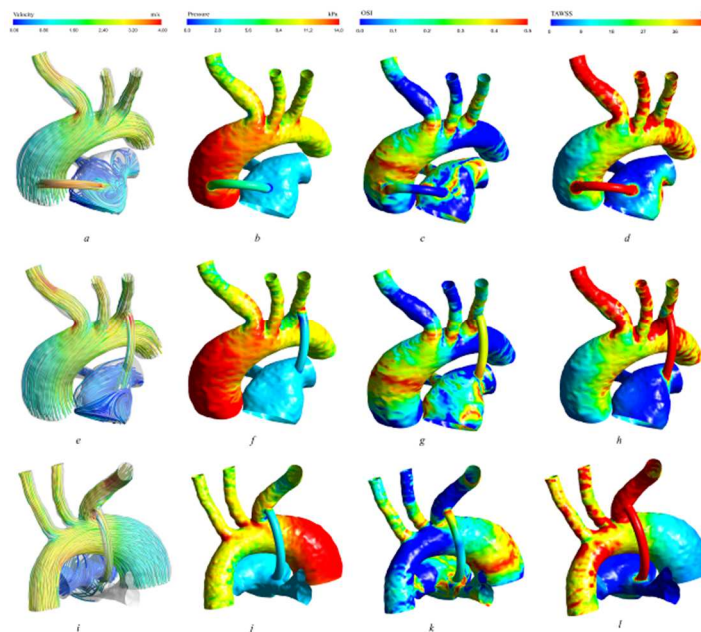


Рис. Распределение скоростей, давлений, колебательного индекса сдвига, пристеночных касательных напряжений, осредненных за сердечный цикл при трех конфигурациях установки шунта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596005.

1. Driscoll D.J., Michels V.V., Gersony W.M. Occurrence risk for congenital heart defects in relatives of patients with aortic stenosis, pulmonary stenosis, or ventricular septal defect // *Circulation*. – 1993. – Vol. 87. – P. 114–120.

2. Кучумов А.Г., Хайрулин А.Р., Биянов А.Н., Породииков А.А., Арутюнян В.Б., Синельников Ю.С. Оценка эффективности установки модифицированного шунта блэлок-тауссиг у детей с врожденным пороком сердца // *Российский журнал биомеханики*. 2020. Т. 24, № 1. С. 64–75.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОКОМПОНЕНТОГО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В.В. Химуля

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
e-mail: valery.khim@gmail.com

В России функционирует не имеющая аналогов в мире Единая система газоснабжения, неотъемлемой частью которой является система подземных хранилищ газа. Исключительная важность подземных хранилищ газа (ПХГ) в России обусловлена преимущественно климатическими особенностями и большой протяженностью территорий страны, которая усложняет транспортировку газа до конечного потребителя. На сегодняшний день наибольшее количество ПХГ создается в истощенных газовых, газонефтяных или газоконденсатных месторождениях, либо в водоносных пластах. Однако при любой конструкции ПХГ его безопасное и эффективное функционирование требует постоянного контроля, а также поддержания правильного режима эксплуатации.

Изменение напряженного состояния в породах-коллекторах при циклических операциях на скважине ПХГ может напрямую влиять на их проницаемость [1]. Снижение проницаемости даже в небольшой окрестности скважины значительно уменьшает ее производительность. Это снижение может также быть связано с эксплуатацией скважины — периодической закачкой больших объемов газа, в котором содержатся твердые частицы и капли масла.



Рис. 1. Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН).

Для существенного увеличения проницаемости пород призабойной зоны скважины одним из наиболее перспективных способов является созданный в ИПМех РАН метод направленной разгрузки пласта. В его основе лежит использование огромной упругой энергии, запасенной в массиве горных пород за счет веса вышележащих пород и пластового давления [2]. Использование метода на месторождениях ПХГ имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с его применением на обычных нефтегазовых месторождениях. Это связано с циклическим изменением пластового давления месторождения в ходе его эксплуатации.

В работе проведено физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в породах пластов ПХГ в условиях реально возникающих на стенках скважины напряженных состояний при реализации метода направленной разгрузки пласта. Исследование было проведено на установке истинно трехосного независимого нагружения в Институте проблем механики РАН (рис.1). Данный испытательный стенд позволяет нагружать кубические образцы горных пород независимо по каждой из трех осей и регистрировать изменение проницаемости в ходе эксперимента [2].

Для каждого исследованного образца пород-коллекторов были составлены и реализованы программы нагружения на основе методов теории упругости. В рамках работы получены кривые деформирования, исследованы зависимости от времени деформаций пород в условиях сложного трехосного нагружения, установлены реологические и фильтрационные характеристики пород и их зависимости от напряжений. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что имеется реальная возможность повышения проницаемости пород-коллекторов ПХГ методом направленной разгрузки пласта за счет создания в окрестности скважин напряжений необходимого уровня.

1. Голодковская Г.А., Калиниченко И.В., Филимонов Ю.Л., Хлопцов В.Г. Изменение деформационных и емкостно-фильтрационных свойств песчано-алевритовых пород при эксплуатации подземных хранилищ газа // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2008. №3. С. 32–40.

2. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Advances in Oil and Gas Exploration and Production // Switzerland: Springer International Publishing, 2020.

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ ФАЗ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

А.А. Чернова, А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: anya_chernova_2504@mail.ru

Исследуется влияние гравитационного расслоения фаз на оптимальные режимы водогазового воздействия на нефтяные пласты, предполагающие поочередную закачку воды и газа с целью вытеснения нефти. Целью данной работы является поиск безразмерного параметра, характеризующего гравитационное расслоение фаз, и исследование его влияния на коэффициент извлечения нефти и на значение чистой приведенной стоимости, характеризующей рентабельность водогазового воздействия. Для этого используется модель, объединяющая в себе физические и экономические параметры течения. Ранее рассматривалась аналогичная модель, описанная в [1], но для одномерного течения. В данной работе исследуются влияние стратификации фаз на оптимальные режимы водогазового воздействия.

Рассматривается двумерная модель нефтяного пласта заданной длины и высоты. На левой и правой границах расположены нагнетающая и добывающая скважины соответственно. В данной работе рассматриваются различные интервалы перфораций скважин и несколько различных режимов поочередной закачки смеси воды и углекислого газа. Параметр, характеризующий гравитационное расслоение фаз, выводится из системы уравнений, состоящей из законов сохранения массы каждой компоненты и закона Дарси. Исследуется влияние данного параметра на чистую приведенную стоимость закачки. Также рассмотрено несколько различных интервалов перфорирования скважин и исследовано их влияние на коэффициент извлечения нефти и чистую приведенную стоимость при различных значениях параметра подобия, характеризующего стратификацию фаз.

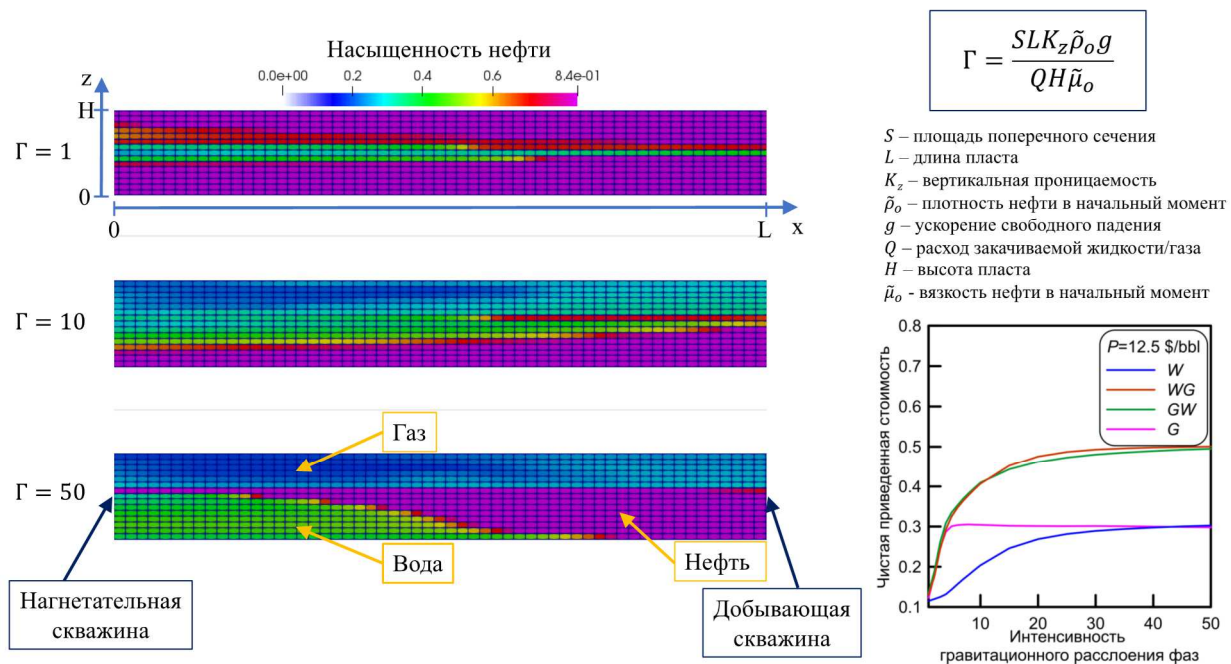


Рис. Результаты расчетов при различных значениях предложенного безразмерного параметра Γ (слева). График зависимости чистой приведенной стоимости от интенсивности гравитационного расслоения фаз для различных стратегий закачки (W – закачка воды, G – закачка газа, WG – закачка воды, затем газа, GW – закачка газа, затем воды) (внизу справа).

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 20-31-80009).

1. Afanasyev A., Andreeva A., Chernova A. Influence of oil field production life on optimal CO2 flooding strategies: Insight from the microscopic displacement efficiency // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. V. 205. P. 108803

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКАЧКИ ВОДЫ И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ИЕРАРХИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ НЕФТЯНОГО ПЛАСТА

А.А. Чернова¹, А.И. Андреева¹, А.А. Афанасьев¹

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

e-mail: anya_chernova_2504@mail.ru

В докладе будет представлен метод ускоренной численной оптимизации закачки воды и CO_2 в нефтяные пласты. Оптимизация предполагает максимизацию чистой приведенной стоимости закачки путем сопряжения модели фильтрации с экономическими расчетами денежных потоков. Предлагаемый метод основан на построении иерархии композиционных моделей нефтяного пласта возрастающей сложности. В работе показано, что оптимальные безразмерные объемы воды и газа очень близки для одномерных и двумерных моделей водогазового воздействия на пласт, т.е. воздействия, предполагающего попеременную закачку воды и углекислого газа. Следовательно, решение задачи одномерной оптимизации дает хорошее приближение к решению двумерной задачи. В предлагаемом методе используется большее количество менее затратных одномерных расчетов фильтрации для того, чтобы получить хорошее начальное приближение для объемов закачки в гораздо более дорогостоящем двумерном моделировании. В численной оптимизации используются алгоритмы безградиентной оптимизации для грубых моделей на низких уровнях иерархии, чтобы гарантировать сходимость к глобальному максимуму чистой приведенной стоимости. Переключение на градиентные методы оптимизации происходит только на верхних уровнях иерархии. В данной работе приведены примеры применения алгоритма для оптимизации различных стратегий водогазового воздействия. Предполагается, что одномерное моделирование состава может быть эффективным для оптимизации площадных схем заводнения CO_2 . Показано, что при оптимизированном заводнении вода и CO_2 появляются одновременно в добывающей скважине.

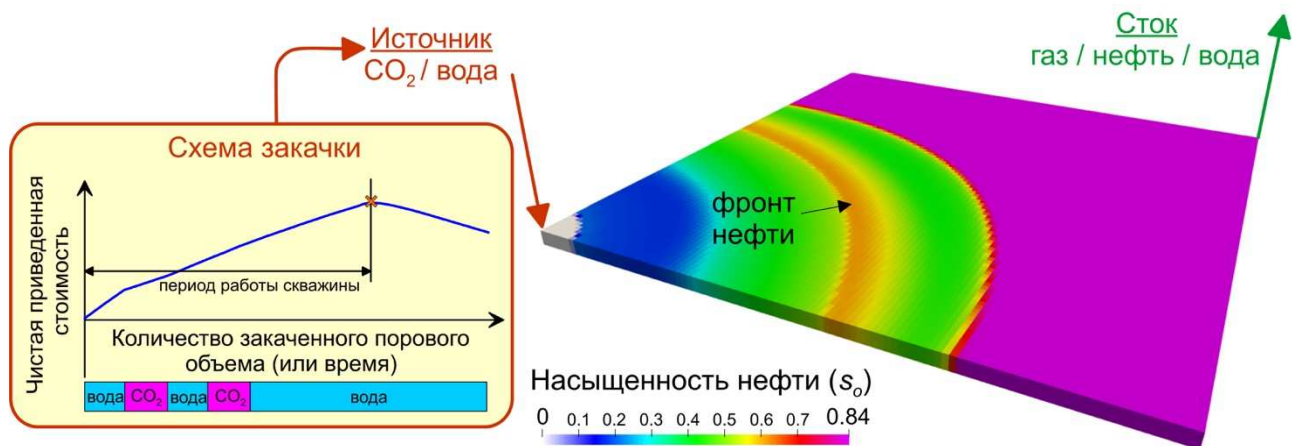


Рис. Схема модели исследования.

Исследования выполнены при поддержке РФФ (№ 19-71-10051).

САМОЛЕТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД МОРСКИМ ЛЬДОМ В АРКТИКЕ

Д.Г. Чечин¹, К. Люпкес², Й. Хартманн²

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

² Гельмгольц-центр Институт полярных и морских исследований, Бремерхафен, Германия

e-mail: chechin@ifaran.ru

Исследование турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя проведено на основе самолетных наблюдений, полученных во время измерительной кампании ACLOUD (Arctic CLOUD Observations Using airborne measurements during polar Day) в июне 2017 года над морским льдом к северу от Шпицбергена. Измерения осуществлялись самолетами-лабораториями Polar 5 и Polar 6 Института им. Альфреда Вегенера (Бремерхафен, Германия) (hsc.). Для расчета турбулентных статистик и их вертикальных профилей внутри пограничного слоя использовались регистрируемые с частотой 100 Гц измерения трех компонент скорости ветра и температуры воздуха. Для анализа выбрано несколько контрастных случаев, отличающихся скоростью ветра, величиной длинноволнового радиационного выхолаживания на верхней границе облачности и высотой пограничного слоя. Показано, что при слабом и умеренном ветре длинноволновое выхолаживание на верхней границе облачности (и соответствующий положительный поток плавучести) является основным механизмом генерации турбулентности в пограничном слое. В этих случаях сильные нисходящие движения («перевернутая» конвекция) наблюдались в облачном слое и подоблачном слое, что выражалось в отрицательных значениях коэффициента асимметрии вертикальной скорости. Турбулентный поток тепла, турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) и дисперсия вертикальной скорости имели ярко выраженный максимум внутри облачного слоя (рис.). Иная турбулентная структура пограничного слоя наблюдалась в случае, когда длинноволновое выхолаживание на верхней границе облачности нижнего яруса было слабым вследствие наличия облачности среднего яруса. В этом случае, ТКЭ достигала меньших значений, а генерация турбулентности происходила за счет сдвига ветра и положительного потока плавучести на поверхности льда. В случае с сильным ветром сдвиговая генерация турбулентности была сопоставима по величине с генерацией за счет длинноволнового выхолаживания на верхней границе облачности. Максимум ТКЭ в этом случае был расположен не в облачном слое, а вблизи поверхности морского льда. Во всех рассмотренных случаях на верхней границе пограничного слоя наблюдался сильный скачок средней температуры воздуха до 5-7 К, а также существенный сдвиг ветра. Сравнение данных наблюдений с решениями диагностической модели перемешанного пограничного слоя при наличии облачности косвенно указывает на наличие турбулентного вовлечения на верхней границы облачности, что имеет важное значение для бюджетов тепла и влаги облачного слоя.

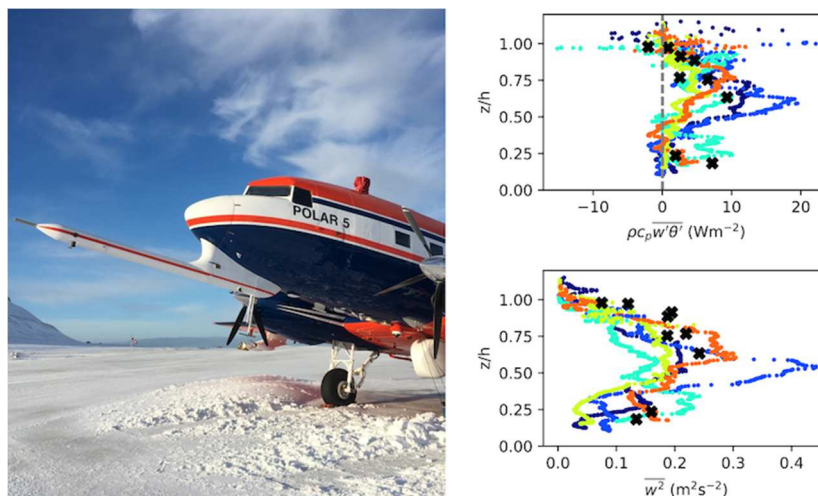


Рис. Слева: Самолет-лаборатория Polar 5 с метеорологическими датчиками на выносе; Справа: Вертикальные профили турбулентного потока явного тепла и дисперсии вертикальной скорости в пограничном слое при наличии кучево-слоистой облачности.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 18-77-10072.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Т.Н. Чикова, В.М. Тверье

Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь
 e-mail: ChikovaTN@gmail.com

Некоторые кости скелета человека внутри имеют пористую структуру, напоминающую губку. Отсюда и название такого типа костной ткани – губчатая. В 19 веке ученые обратили внимание, что структурные единицы губчатого вещества располагаются вдоль преобладающей нагрузки, действующей на костную ткань [1], что делает ее прочнее в данном направлении. Дальнейшие наблюдения показали, что в течение жизни структура губчатой ткани может меняться в зависимости от внешней нагрузки. Способность кости приспосабливать внутреннюю структуру к внешним воздействиям привлекла многих врачей и учеными своими широкими возможностями. Исправление прикуса посредством брекетов – один из ярких примеров использования адаптационных свойств кости на благо человечества.

В данной работе представлена модель адаптации кости, в основе которой лежит гипотеза о том, что структурные единицы костной ткани в процессе адаптации выстраиваются вдоль линий действия наибольших механических нагрузок. Для описания изменения структуры используется система кинетических уравнений, согласованных с обобщенным законом Гука, в котором свойства материала рассчитываются на основе тензора структуры [2,3,4]. Расчет ведется в программных продуктах ANSYS и MATLAB по схеме, изображенной ниже:

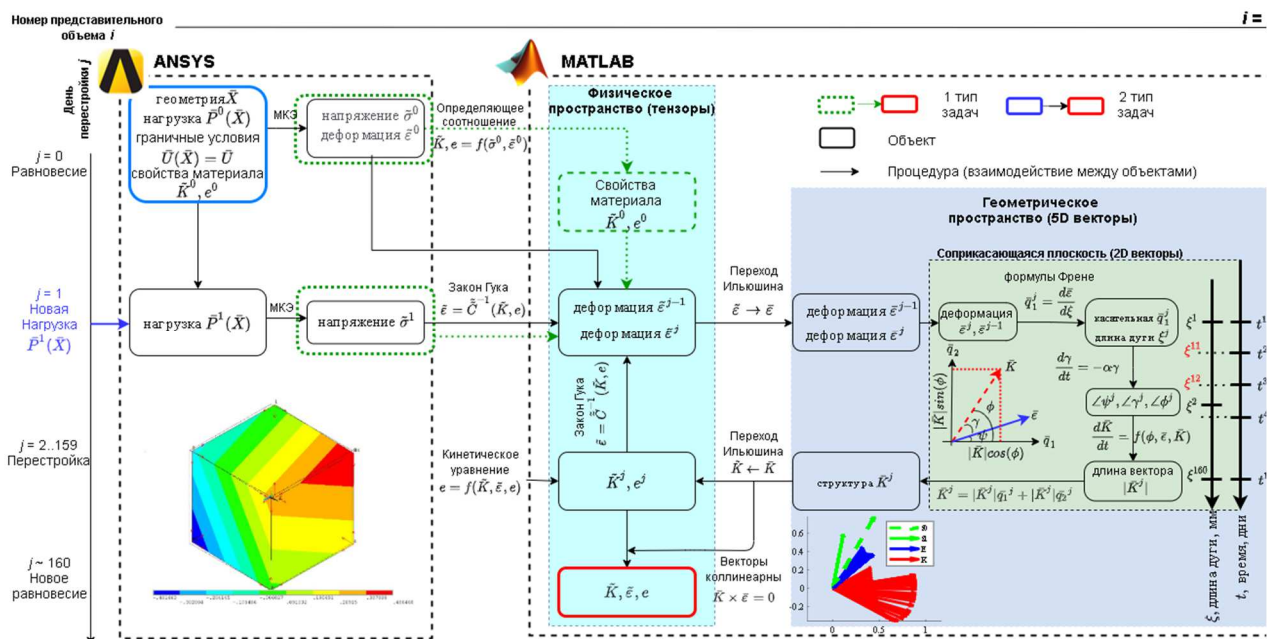


Рис. Реализация модели адаптации губчатой костной ткани.

При помощи данной модели возможно предсказать результат врачебного вмешательства для каждого пациента в каждом конкретном случае и, при необходимости, скорректировать силу и направление воздействия на костную ткань.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

1. Wolff J. Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin: Hirshwald, 1892. 416 p.
2. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк. 1990. 368 с.
3. Чикова Т.Н и др. Моделирование перестройки трабекулярной костной ткани в ветви нижней челюсти человека // Российский журнал биомеханики. 2018. Т. 22. № 3. С. 292–300.
4. Тверье В.М. Кинетические уравнения перестройки трабекулярной костной ткани в пространстве Ильюшина. // Российский журнал биомеханики. 2019. Т.23. № 2. С. 293-301.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТАДИЙ ПЛОЩАДКИ ТЕКУЧЕСТИ И ЛИНЕЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.О. Чирков, М.О. Ерёмин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
e-mail: chirkovartyem@gmail.com

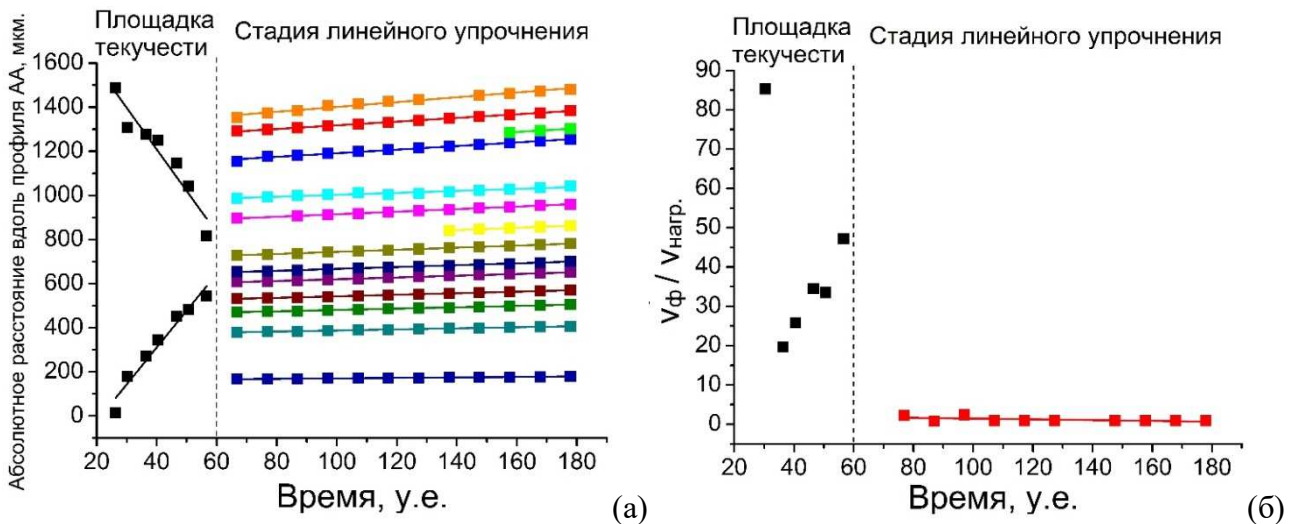


Рис. 1 – Кинетическая диаграмма, полученная в результате обработки данных моделирования (а), отношения скорости максимума пластической деформации к скорости нагружения (б).

Проведён численный анализ стадий пластической деформации: площадки текучести и стадии линейного деформационного упрочнения низкоуглеродистой стали. При пластическом течении одни максимумы пластической деформации исчезают, а другие становятся ведущими. Последние обеспечивают основу для формирования раннего макроскопического очага разрушения. На основе полученных кинетических диаграмм выявлены особенности локализации пластической деформации на стадии линейного упрочнения. Применяется конечно-разностный анализ на основе микроструктуры. Был применён метод пошагового заполнения для получения представительного объёма поликристаллического образца.

Показано, что полосы Людерса распространяются неоднородно, со средним отношением скорости фронта к скорости нагружения равным ≈ 35 , что хорошо согласуется с данными, полученными в экспериментах. Также показано, что абсолютное положение максимумов распределения пластической деформации изменяется со скоростью, равной скорости нагружения. Последнее свидетельствует о том, что взаимное расположение максимумов не меняется в процессе пластического течения.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-31-90016.

1. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Хон Ю.А., Еремин М.О., Бакеев Р.А., Перышкин А.Ю., Зими́на В.А., Чирков А., Казакбаева А.А., Ахметов А.Ж., 2021. Автосолитонная концепция сейсмического процесса. Часть 2. Численные исследования генерации и распространения медленных деформационных автосолитонных возмущений. Физ. мезомех. Т. 24, № 1. С. 18–36. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2021-11002>.

КОМПАКТНАЯ РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С РАЗРЫВНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ. ЛИНИЯ СКАЧКА КОЭФФИЦИЕНТА С ИЗЛОМОМ

В.А. Гордин^{1,3}, Д.А. Шадрин^{2,3}

¹ НИУ ВШЭ факультет экономики, Москва

² НИУ ВШЭ факультет математики, Москва

³ Гидрометцентр России, Москва

e-mail: vagordin@mail.ru, shadrin.dmitry2010@yandex.ru

Разработана компактная разностная схема 4-го порядка точности для решения 2-мерных краевых задач для уравнений Пуассона (1) и Гельмгольца (2), которые имеют множество приложений в технике и физике (в т.ч. геофизике [1]). Как правило, коэффициент \mathcal{D} – кусочно-непрерывная функция, она имеет скачок на линии Γ , которая содержит изломы. В данном случае (рис.)

$$\operatorname{div}(\mathcal{D}(x, y) \operatorname{grad}(u(x, y))) = f(x, y) \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\mathcal{D}(x, y) \operatorname{grad}(u(x, y))) + \rho U(x, y) = f(x, y) \quad (2)$$

На внешней границе вычислительной области для решения u ставятся граничные условия Неймана или Дирихле. На линии стыка Γ – условия Кирхгофа (3).

$$[u] = 0 \quad (3a), \quad [\mathcal{D} \partial_n u] = 0 \quad (3b)$$

Здесь $[\]$ – осцилляции функции на Γ , ∂_n – производная вдоль нормали к Γ .

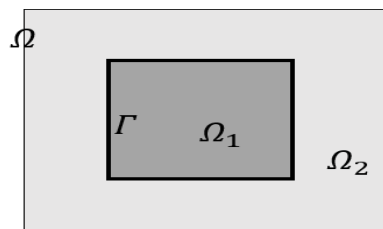


Рис. Схема области вычислений Ω , разделенной на однородные подобласти Ω_1, Ω_2 , линия скачка Γ обозначена жирной линией.

Задача (1)–(3) описывает распределение тепла (или электростатического потенциала (2), (3)) для области из двух сред, например, проводника прямоугольного сечения, окруженного слоем диэлектрика.

Численные эксперименты подтверждают 4-й порядок компактной схемы при большом скачке коэффициента \mathcal{D} (примерно в 10000 раз). Данный порядок точности не достигался в других работах [2]. Особая сложность компактной аппроксимации состоит в подборе шаблонов и тестовых функций [3] для аппроксимации дифференциальной задачи около углов Γ . В точках излома Γ для аппроксимации было использовано разложение решения u в ряд по обобщенным собственным функциям дифференциального оператора из уравнения (1). Данные функции брались в качестве тестовых. В точках около углов использовался смешанный набор из обобщенных собственных функций и мономов.

Работа подготовлена в ходе проведения исследования (№ 20-04-021) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“ (НИУ ВШЭ)» в 2020 — 2021 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».

1. M.Schneider, D.Gläser, B.Flemisch, R. Helmig, Comparison of finite-volume schemes for diffusion problems, Oil Gas Sci. Technol. Rev. IFP Energ. Nouvelles 73 (2018) 82, <http://dx.doi.org/10.2516/ogst/2018064>.

2. Raphael Herbin, Florence Hubert. Benchmark on Discretization Schemes for Anisotropic Diffusion Problems on General Grids. Finite volumes for complex applications V, Jun 2008, France. pp.659–692.

3. А.А. Самарский, Е.С. Николаев, Методы решения сеточных уравнений. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва Наука, 1978.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА И АЭРОЗОЛЯ В ЗАКРЫТОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ЧЕРЕЗ РЕЗОНАНСНУЮ ЧАСТОТУ

Л.Р. Шайдуллин., А.А. Кабиров

Институт механики и машиностроения – обособленное структурное
подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань
e-mail: shaidullin@imm.knc.ru

Воздействие волновых процессов на ограниченную многофазную среду приводит к возникновению нелинейных явлений [1]. В работе [2] рассматриваются резонаторы в виде конуса, рупора или колбы. Создаваемые колебания сильно влияют на поведение частиц в данных объемах [3]. Например, изменению поля средней температуры [4], усилению перемешивания [5], ускорению осаждения и увеличению теплообмена среды [6]. Ранее рассматривались осаждения частиц аэрозоля при резонансных колебаниях в трубах [7].

В данной работе исследуется динамика аэрозоля в резонаторе прямоугольного сечения вблизи резонансной частоты (рис.). Получены значения колебаний давления газа вблизи резонанса. Выявлено, что начальная концентрация капель монотонно уменьшается со временем по сравнению с естественным осаждением.

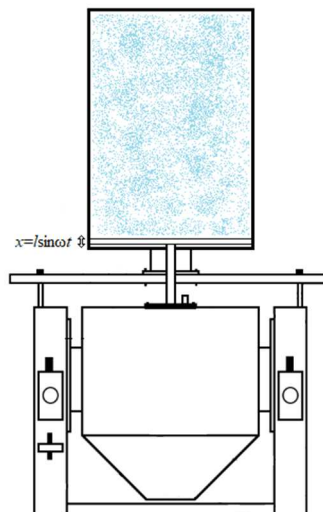


Рис. Внешний вид экспериментальной установки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00144).

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред // Москва: Наука. 1987. Т. 1. 464 с.
2. Mortell M.P., Seymour B.R. Nonlinear resonant oscillations in closed tubes of variable cross section // J. Fluid Mech. 2004. V. 519. P. 183–199.
3. Davidson G.A., Jager W. Turbulence and aerosol coagulation in high intensity sound fields // J. Sound and Vibr. 1980. V. 72. №. 1. P. 123.
4. Daru V., Baltean-Carles D., Debesse P., Gandikota G. Two-dimensional numerical simulations of nonlinear acoustic streaming in standing waves // Wave Motion. 2013. V. 50. P. 955–963.
5. Аганин А.А., Кузнецов В.Б., Мартынов Е.В., Смирнов Э.Т. Экспериментальное и численное исследование акустических течений около объемных резонаторов // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 6. С. 61-71.
6. Tkachenko L.A., Shaidullin L.R., Kabirov A.A. Acoustothermal Effect in an Open Tube with Section Leap for Nonlinear Gas Oscillations // Lobachevskii J. Math. 2020. V. 41. P. 1300–1304.
7. Gubaidullin D. A., Zaripov R. G., Tkachenko L. A., Shaidullin L. R. Deposition of polydisperse gas suspensions with nonlinear resonance oscillations in a closed tube // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145. № 1. EL30- EL33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРЕ С ВЕРХНИМ И НИЖНИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТОРЦОМ

Б.Р. Шарифуллин, С.Г. Скрипкин, И.В. Наумов
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
e-mail: sharifullinbulat@mail.ru

Моделирование режимов работы вихревых реакторов необходимо для интенсификации тепло- и массопереноса. Вихревое перемешивание является распространённым методом интенсификации химических и биологических процессов [1]. Сравнительно недавно внимание исследователей привлекли двухфазные вращающиеся течения в связи с развитием газо-вихревых биореакторов. В отличие от традиционных биореакторов газо-вихревой способ перемешивания лишён основных недостатков таких, как механическое воздействие на выращиваемую культуру, низкий газовый массообмен, наличие застойных зон. Удобной моделью биореактора является вертикальный цилиндрический контейнер, где движение рабочей жидкости генерируется через некоторую жидкую или газообразную среду вращением одного из торцевых дисков [2].

В работе было проведено экспериментальное исследование структуры вихревого течения двух несмешиваемых жидкостей в закрытом вертикальном цилиндрическом контейнере с вращающимся торцом (рис. а). Проведено сравнение структуры течения в зависимости от закрутки потока (I) верхним или (II) нижним торцом цилиндра. Исследования вихревого движения проводились в цилиндрических стеклянных контейнерах различного диаметра (90-150 мм). Использовались две несмешиваемые жидкости: (I) водный раствор глицерина с кинематической вязкостью $\nu_g = 3 \text{ мм}^2/\text{с}$ и подсолнечное масло с $\nu_o = 49 \text{ мм}^2/\text{с}$, (II) водный раствор глицерина с $\nu_g = 70 \text{ мм}^2/\text{с}$ и полиметилсилоксановое масло с $\nu_o = 8 \text{ мм}^2/\text{с}$.

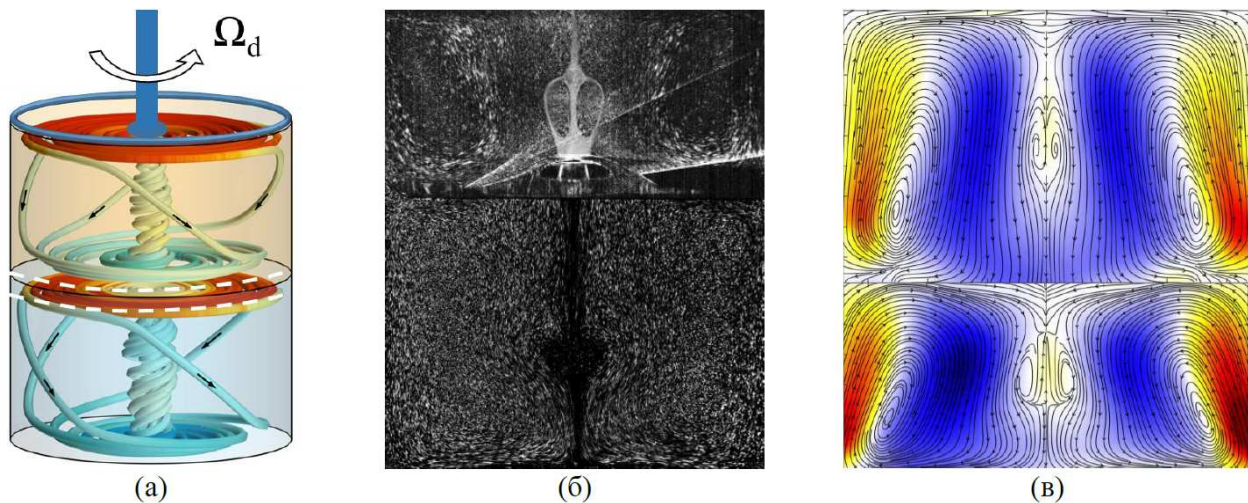


Рис. Схема вихревого течения при малых Re (а), визуализация вихревого течения при закрутке сверху при $Re = 750$ (б), линии тока, полученные методом PIV, при закрутке снизу при $Re = 550$ (в).

С помощью методов трековой визуализации потока и PIV был исследован процесс формирования вихревого течения в двухкомпонентной жидкости за счёт центробежной циркуляции в зависимости от закрутки потока верхним или нижним вращающимся торцом. Было установлено, что формирование структуры при закрутке снизу происходит аналогично вихрю при закрутке сверху, поскольку гравитационные силы не оказывают существенного влияния на структуру потока (рис. б,в). Выявлено, что деформация границы раздела происходит похожим образом, однако имеются различия в её форме и диапазонах чисел Рейнольдса и Фруда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-19-00083.

1. Shtern V. Cellular Flows // Cambridge: Cambridge University Press 2018. 573 p.
2. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow // Phys. Fluids. 2020. V.32. 061706.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВОТОКА В ОКРЕСТНОСТИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ ПРИ МНОГОЭТАПНОЙ ЭМБОЛИЗАЦИИ

Т.С. Шарифуллина¹, А.А. Черевко^{1,2}, В.В. Остапенко^{1,2}
¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
²Новосибирский государственный университет, Новосибирск
e-mail: tatiana_06.08@mail.ru

Церебральная артериовенозная мальформация (АВМ) является патологией развития сосудов головного мозга, при которой артериальное и венозное кровеносные русла соединены клубком беспорядочно переплетенных выродившихся сосудов. Наиболее предпочтительным методом лечения данных патологий является эмболизация - внутрисосудистое заполнение клубка патологических сосудов АВМ специальным эмболическим агентом (например, ONYX) с целью блокирования кровотока через них. Данный способ хирургического вмешательства широко применяется, но до сих пор в некоторых случаях сопровождается периоперационным разрывом сосудов мальформации. В работе математически моделируется процесс эмболизации и строится алгоритм, позволяющий находить её оптимальные режимы.

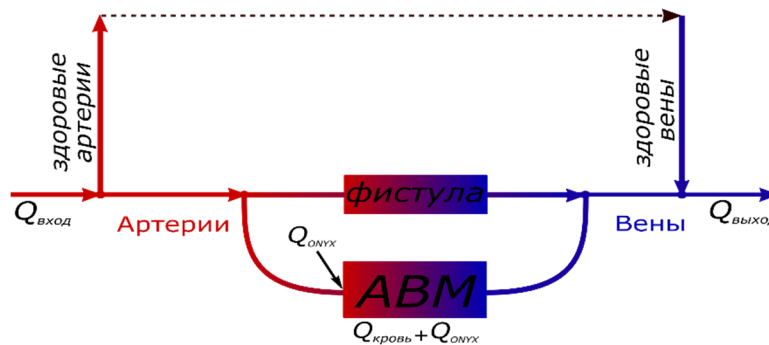


Рис. Модель эмболизации АВМ, включенная в систему церебрального кровообращения.

Для описания процесса эмболизации предлагается модель, в которой наряду с течением крови и эмболического агента в мелкососудистой части АВМ и фистуле (крупном выделенном сосуде патологии) учитывается перераспределение крови в окружающие здоровые сосуды. Процесс эмболизации АВМ моделируется как процесс двухфазной фильтрации несмешивающихся несжимаемых жидкостей, где вытесняемой фазой является кровь, а вытесняющей – эмболический агент; получаемая система уравнений решается численно с помощью монотонной модификации схемы SABARET [1]. Во время эмболизации поток крови, поступающий в АВМ, меняется за счет перераспределения в соседние здоровые сосуды из-за увеличивающегося во время операции сопротивления патологии, в модели этот эффект учитывается путем введения дополнительных соотношений.

Основная цель работы заключается в отыскании оптимального с точки зрения безопасности и эффективности сценария эмболизации. Целевой функционал и ограничения, возникающие в такой задаче оптимального управления, выбираются в соответствии с медицинскими показаниями, а управлением является объёмный расход эмболического агента на входе в АВМ. Сформулирована и, для специального закона подачи эмболического агента, численно решена задача оптимального управления многоэтапной эмболизацией. При решении задачи использовались клинические данные, полученные во время мониторинга гемодинамических параметров во время нейрохирургических операций в НМИЦ им. Мешалкина [2].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-71-10034).

1.Cherevko A.A., Gologush T.S., Petrenko I.A., Ostapenko V.V., Panarin, V.A. Modelling of the arteriovenous malformation embolization optimal scenario //Royal Soc. Open Sci. 2020. Vol. 7. №. 7. P. 191992.

2. Khe A.K. et al. Monitoring of hemodynamics of brain vessels // J. App. Mech. Tech. Phys. 2017. Vol. 58. P. 763–770.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОСУДИСТЫХ ТРАНСПЛАНТАТОВ GORE-TEX

М.И. Шмурак¹, А.Г. Кучумов¹, А.Ф. Мерзляков²

¹Факультет прикладной математики и механики, ПНИПУ, Пермь

²Механико-Математический факультет ПГНИУ, Пермь

e-mail: shmurak2007@yandex.ru

В настоящее время в хирургии широко используются сосудистые трансплантаты. Во всем мире существует практика применения искусственных сосудов, изготовленных с использованием полиэфирных или политетрафторэтиленовых волокон. Такие сосуды называются шунтами. Наиболее распространены шунты из расширенного микропористого политетрафторэтилена производства Gore-Tex и полиэтилентерефталата производства Dacrons. В России чаще используются трансплантаты Gore-Tex.

Механические свойства шунтов играют большую роль в осуществлении нормального кровотока. В частности, при прогнозировании исхода операции можно применять методы математического моделирования [1]. Для корректной постановки задачи требуются параметры шунта.

Проведен ряд экспериментов на сосудистых трансплантатах Gore-Tex на растяжение и на разрыв.

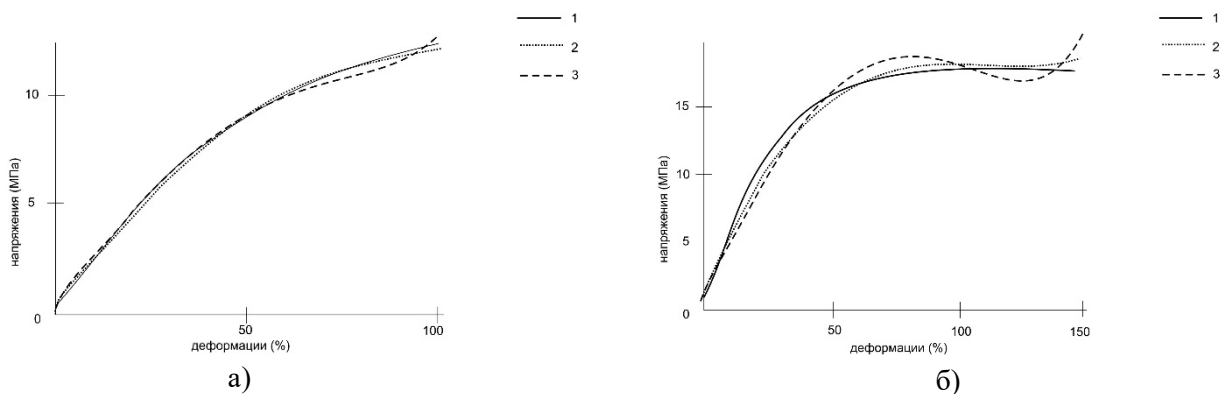


Рис. График изменения напряжения от деформации (а - образец №1, б - образец №2). Сплошная линия (1) – экспериментальная кривая, пунктирная линия (2) – функция энергии деформации Муни-Ривлина 5-го порядка, пунктирная линия (3) – функция энергии деформации Йо 3-го порядка.

Определен предел прочности, величина которого увеличивается с увеличением диаметра образца (Zwick Z-250).

По полученным экспериментальным зависимостям напряжение-деформация при растяжении были определены константы для функции энергии деформации Муни-Ривлина 5-го порядка и Йо 3-го порядка. На рисунке показаны графики изменения напряжение-деформация для двух образцов: образец №1 диаметром 5 мм, толщиной 0,5 мм, длиной 20 мм, образец №2 диаметром 3 мм, толщиной 0,35 мм, длиной 20 мм. Скорость приложения нагрузки 30 мм/мин, преднагрузка 0,5 МПа. Параметры гиперупругих моделей шунта Gore-Tex, найденные экспериментально, позволят провести анализ влияния учета их гиперупругости на течение крови по трансплантату и окружающим сосудам.

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-41-596005).

1. Синельников Ю.С., Арутюнян В.Б., Породииков А.А., Биянов А.Н., Туктамышев В.С., Шмурак М.И., Хайрулин А.Р., Кучумов А.Г. Применение математического моделирования для оценки результатов формирования системно-легочных анастомозов // Патология кровообращения и кардиохирургия. 2020.24(3). С. 45-61.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ НЕРОВНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА

А.А. Яковенко^{1,2}

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва
e-mail: anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Учет шероховатости взаимодействующих тел приводит к необходимости рассмотрения задач дискретного контакта. Шероховатость представляет собой совокупность неровностей различной формы и размеров, расстояние между которыми много меньше характерной длины макротела. Шероховатость образует микрорельеф, который может иметь случайный (статистический) или регулярный характер. В данной работе рассмотрен регулярный микрорельеф, который моделируется периодической системой одинаковых инденторов.

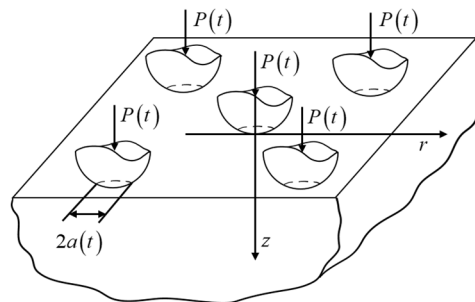


Рис.1 Схема контактного взаимодействия периодической системы инденторов с полупространством.

Исследовано взаимодействие с вязкоупругим полупространством периодической одноуровневой системы жестких инденторов (рис.1), форма поверхности которых описывается степенной функцией, а именно $f(r) = Cr^{2n}$ (C - константа, n - натуральное число). К каждому индентору приложена заданная нагрузка $P(t) = P_0H(t)$, где P_0 - константа, а $H(t)$ - функция Хевисайда. Плотность расположения инденторов определяется средним количеством неровностей на единице площади \bar{N} . Регулярность пространственного расположения неровностей позволяет ввести величину номинального давления, а именно $\bar{p}(t) = P(t)\bar{N}$.

Для решения задачи использовался метод локализации [1], согласно которому в рассмотрение берется лишь заданное количество неровностей, ближайших к рассматриваемому, а действие остальных заменяется распределенным по полупространству вне круга радиуса A номинальным давлением $\bar{p}(t)$. В данной работе исследовался простейший случай, когда реальное распределение контактных давлений учитывается только под поверхностью рассматриваемого индентора. Для описания поведения вязкоупругого полупространства используются интегральные соотношения с одной функцией релаксации $E(t)$ (или функцией ползучести $J(t)$), то есть считается, что коэффициент Пуассона $\nu = const$. Показано, что вязкоупругая задача сводится к аналогичной задаче в упругой постановке. Исследована модель Максвелла и модель стандартного вязкоупругого тела.

Получены зависимости от времени следующих контактных характеристик: распределение контактного давления на единичном пятне контакта, радиус единичного пятна контакта и функция дополнительного смещения. Исследовано влияние на эти характеристики формы неровностей и плотности их расположения. Для случая $n=1$ результаты представлены в работе [2]. Показано также, как с помощью полученных результатов можно перейти к задаче на макроуровне, то есть исследования взаимодействия тел на макроуровне с учетом микрорельефа контактных поверхностей [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-01-00400).

1. Горячева И.И. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.

2. Yakovenko A., Goryacheva I. The Periodic Contact Problem for Spherical Indenters and Viscoelastic Half-Space // Tribology International. 2021.

3. Goryacheva I.G. Mechanics of discrete contact // Tribology International, 39. 2006. Pp. 381-386.

НЕЯВНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ДИНАМИЧЕСКИ АДАПТИВНЫХ СЕТКАХ

Р.М. Янбарисов¹

¹Институт Вычислительной Математики РАН им. Г.И.Марчука, Москва

e-mail: ruslan.yanbarisov@gmail.com

В данной работе представлен новый подход для моделирования течений неньютоновских (вязкоэластичных, описываемых уравнением Олдройд-Б, и вязкопластичных, описываемых уравнениями Хершеля-Балкли) жидкостей со свободной поверхностью на динамически адаптивных сетках типа восьмеричное дерево. Численный метод основан на полу неявной схеме интегрирования по времени с разнесенным расположением неизвестных, и состоит из двух подшагов: переноса жидкой области по известному полю скоростей и полностью неявному решению уравнений импульса, несжимаемости и уравнения состояния (для вязкоэластичных жидкостей). Модель верифицирована на серии численных экспериментов и данных из литературы.

Основной новизной работы является расширение существующего солвера несжимаемых течений на вязкоэластичные жидкости с полностью неявным подшагом нахождения неизвестных, что предоставляет бóльшую робастность моделирования течения неньютоновских жидкостей.

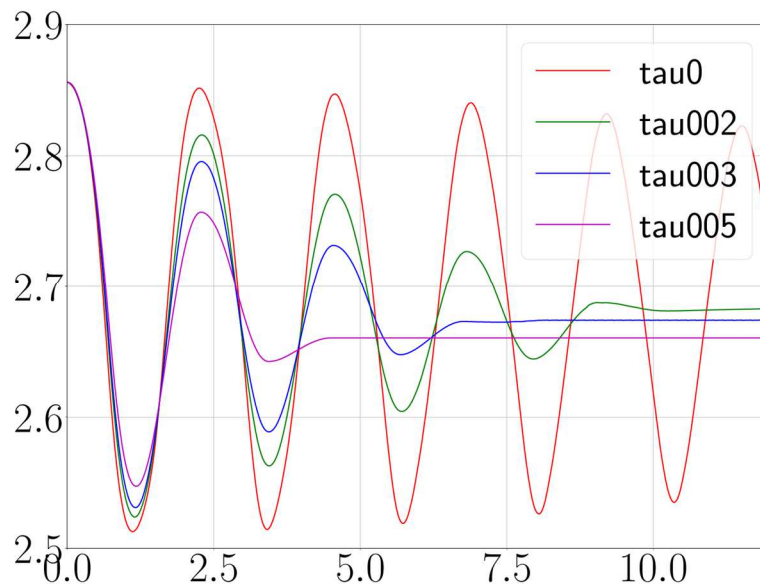


Рис. Траектория верхней точки колеблющейся в вакууме капли Бингамовской жидкости с различными значениями порогового напряжения Бингама.

Разработка метода была поддержана Московским центром фундаментальной и прикладной математики (договор с Минобрнауки России № 075-15- 2019-1624).

1. Yanbarisov R., Nikitin K., Vassilevski Y. An implicit scheme for simulation of free surface non-Newtonian fluid flows on dynamically adapted grids. // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2021, V. 36, No. 3, P. 165-176.

2. Nikitin K., Olshanskii M., Terekhov K., Vassilevski, Y. A numerical method for the simulation of free surface flows of viscoplastic fluid in 3d. // Journal of Computational Mathematics, V.29, No.6, P.605—622.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПАНДЕМИИ COVID-19 НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

А.Д. Ястребов¹, В.В. Аристов², А.В. Строганов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

²Вычислительный центр им. А.А. Дородницына, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва

e-mail: andr.yast711@gmail.com

Пространственное распространение пандемии COVID-19 изучается с помощью кинетического метода с введением двух параметров. Предлагается одномерная модель на основе уравнения кинетического типа для изучения динамической плотности распределения носителей вируса во времени и пространстве с учетом их миграции из выделенного центра. Данная модель является новой и принципиально отличается от известных моделей типа диффузия-реакции. Строится аналитическое решение; для получения серии расчетов применяются и численные методы. Производится сравнение модельных и реальных данных в Италии, России и Чили (возможность применения простой одномерной модели для этих стран связана с особенностями их географического положения). Помимо скорости заражения, вводится в рассмотрение «скорость выздоровления». При прохождении волны выздоровления по территории с большей частью населения страны делается вывод о начале глобального выздоровления, что соответствует реальным данным. Предсказания оказываются точными и для второй волны пандемии в России. Ожидается, что модель способна адекватно описать не только развитие COVID-19, но и последующих эпидемий.

1. В.В. Аристов, А.В. Строганов, А.Д. Ястребов. Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки. 2021, Т. 498, С. 27–32.

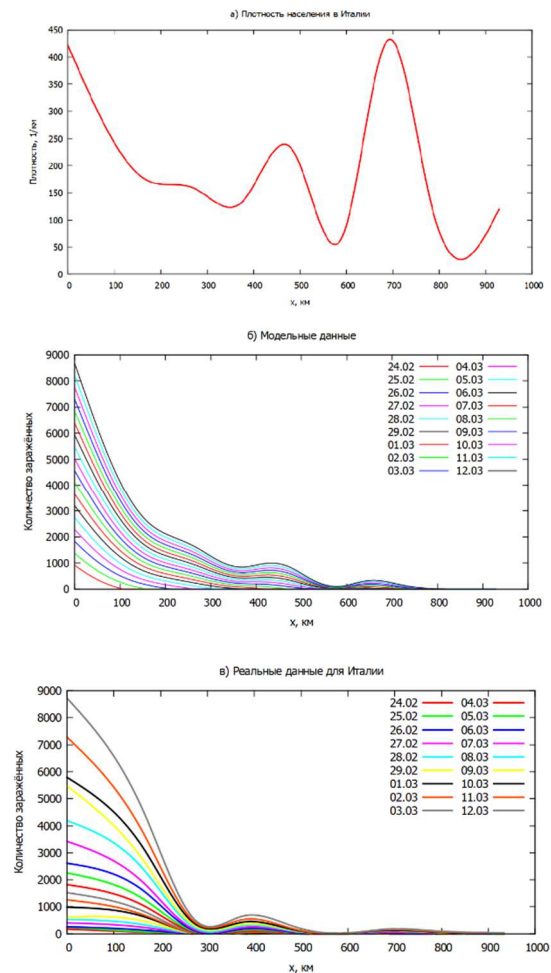


Рис. Плотность населения в Италии (а), модельные данные для 18 дней, начиная со второго дня (б) и реальные данные за 18 дней с 24 февраля для Италии (в).

Научное издание

***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ-МЕХАНИКОВ***
посвященная 60-летию первого полета человека в космос

3 – 12 сентября, 2021 г.; Сочи, "Буревестник" МГУ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Электронное издание сетевого распространения

Публикуется в авторской редакции

Макет утвержден 18.08.2021

Формат 60x84 1/8
Усл. печ. л. 20

Издание № 11890

Издательство Московского университета

119191, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

(ул. Академика Хохлова, д. 11)

<http://youngschool.imec.msu.ru/images/conference/files/Thesis2021.pdf>