



НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ
YSM-2020***

***3–13 СЕНТЯБРЯ 2020
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-2020 (3–13 сентября 2020 г., Сочи, «Буревестник» МГУ): Тезисы докладов. – М.: Издательство Московского университета, 2020. – 165 с.

ISBN 978-5-19-011531-4

Проведение Всероссийской конференции молодых учёных-механиков направлено на поддержание высокого уровня фундаментальных и прикладных исследований молодых ученых, сохранение и развитие научных школ и преемственности поколений в ведущих научных коллективах и генерирование 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 РФФИ, проект №20-01-22026.

УДК 531/534
ББК 22.2

ISBN 978-5-19-011531-4

© Московский государственный
Университет имени
М.В.Ломоносова, 2020 г.

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

А.О. Ватульян (ЮФУ, Ростов-на-Дону); А.В. Карапетян (МГУ, Москва); Ю.С. Качанов (ИТПМ СО РАН, Новосибирск); Т.П. Любимова (ПГНИУ, Пермь); Р.И. Нигматулин (ИО РАН, Москва); Н.В. Никитин (МГУ, Москва); В.А. Самсонов (МГУ, Москва); А.Б. Фрейдин (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург); М.А. Шеремет (ТГУ, Томск)

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; Н.В. Горохова; А.Г. Здитовец; О.О. Иванов; Б.И. Краснопольский; М.Ю. Погосбемян; О.Г. Сутырин; В.В. Терауд

СОДЕРЖАНИЕ

А.О. Ватульян ТИПЫ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ В МЕХАНИКЕ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ	13
И.Г. Горячева ИЗНАШИВАНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТ	14
А.В. Карапетян ОБОБЩЕННЫЕ ДИАГРАММЫ СМЕЙЛА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К КАЧЕСТВЕННОМУ АНАЛИЗУ ДИССИПАТИВНЫХ СИСТЕМ С СИММЕТРИЕЙ	15
Ю.С. Качанов, В.И. Бородулин ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ – РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	16
Т.П. Любимова УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ НЕОДНОРОДНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ВИБРАЦИЙ	17
Р.И. Нигматулин ФОКУСИРОВКА ЭНЕРГИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ	18
Н.В. Никитин ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЫЗВАННАЯ ВХОДНЫМ ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ	19
В.А. Самсонов ДИНАМИКА ДВУХЗВЕННОГО МАЯТНИКА	20
А.Б. Фрейдин ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ СВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ МЕХАНОХИМИИ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ	21
М.А. Шеремет МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА	22
И.А. Амелюшкин, О.В. Дружинин, А.В. Усов КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК И ИСПЫТАНИЙ СВЕРХЛЕГКОГО САМОЛЕТА	24
И.А. Амелюшкин МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЬДОФОБНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ	25
А.И. Андреева, А.А. Афанасьев ОПТИМИЗАЦИЯ РАССТАНОВКИ СКВАЖИН ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	26
А.А. Афанасьев ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ СРЕДЕ	27
А.А. Афанасьев РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ MUFITS	28
В.С. Афанасьев, Н.В. Баничук, С.Ю. Иванова ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО ДВИЖУЩЕГОСЯ РАСТЯГИВАЕМОГО ВЯЗКОГО МАТЕРИАЛА	29
С.М. Босяков, М.А. Афанасьева, С.А. Голякевич, И.Э. Шпилевский ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕДРЕННОЙ КОСТИ НА ОСНОВАНИИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ	30
Н.С. Белоусова, О.Г. Глотов, А.В. Гуськов ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА В ВОЗДУХЕ	31

<u>Д.Е. Бесчеров, М.Н. Ереев, А.С. Марков, В.А. Панов, Д.Н. Свешников</u> РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	32
<u>Р.М. Бикбаев, I.A.Palani, Н.Н. Реснина, С.П. Беляев, S. S. Mani Prabu, М. Manikandan, S. Jayachandran, Anshu Sahu</u> ОБРАТИМАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И НАГРЕВАНИИ ПОД НАГРУЗКОЙ 5-ТИ СЛОЙНОГО ОБРАЗЦА СПЛАВА TiNi , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ	33
<u>Г.А. Фараносов, О.П. Бычков</u> О СВЯЗИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МОДЫ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ С ПУЛЬСАЦИЯМИ ПРОДОЛЬНОЙ СКОРОСТИ НА ОСИ ДОЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ	34
<u>Х.Ф. Валиев, А.Д. Егорян</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА С ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ НА ВОЛНУ ЧЕПМЕНА-ЖУТЕ И ОБРАТНО	35
<u>А.Д. Егорян, Х.Ф. Валиев</u> О РОЛИ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ В РАСЧЕТЕ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРД	36
<u>Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко, Е.А. Яковлев</u> К ЧИСЛЕННОМУ ИНТЕГРИРОВАНИЮ УРАВНЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗВУКОВОМУ УДАРУ	37
<u>I.A. Varian, N.N. Kolesnikova, E.E. Mastalygina, A.A. Popov</u> ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА НА БИОРАЗЛАГАЕМОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ	38
<u>М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, А.А. Кандауров, Ю.И. Троицкая</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОГРАНИЧНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ СЛОЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УСЛОВИЙ ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В УСЛОВИЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	39
<u>Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая, М.И. Вдовин</u> МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ БРЫЗГ ПО ДАННЫМ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ПОТОКА	40
<u>А.А. Кандауров, Д.А. Сергеев, О.С. Ермакова, М.И. Вдовин</u> КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	41
<u>В.В. Веденеев</u> НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АЭРОУПРУГОЙ ДИВЕРГЕНЦИИ КРЫЛА	42
<u>В.В. Веденеев</u> УЕДИНЁННЫЕ ВОЛНЫ В ГИПЕРУПРУГИХ ТРУБКАХ, СОДЕРЖАЩИХ ДВИЖУЩУЮСЯ ВЯЗКУЮ ЖИДКОСТЬ	43
<u>Е.А. Веденева</u> РАСТЕКАНИЕ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ С УЧЕТОМ ИХ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИЯХ ТРЕЩИННОГО ТИПА	44
<u>Е.А. Веденева, А.А. Афанасьев</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАКАЧКИ ГАЗА И ВОДЫ В НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ	45
<u>Г.С. Ганченко, Н.Ю. Ганченко, В.С. Шелистов, Н.В. Никитин</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО ТИПА МИКРОМИКСЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛЫ	46
<u>Е.А. Франц, В.С. Шелистов, В.А. Попов, Г.С. Ганченко</u> УСТОЙЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО СЛЕДА ЗА ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛОЙ ПРИ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ ВТОРОГО РОДА	47

Г.С. Ганченко, В.А. Артюхов, Р.Р. Пономарёв, Е.А. Демёхин ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ИОНΟΣЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА	48
М.А. Гарбуз СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПЕРЕДАЧ В МОДЕЛИ СУДОВОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ	49
В.В. Веденеев, Д.Р. Гареев, Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, В.В. Трифонов, А.Д. Чичерина ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРУГЛОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ	50
Т.С. Гологуш, А.А. Черевко, В.В. Остапенко МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ЭМБОЛИЗАЦИИ АВМ С ПЕРЕТОКАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ	51
А.П. Голуб ОЦЕНКА ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА	52
И.В. Голубкина, А.Н. Осипцов ТЕПЛООБМЕН В СВЕРХЗВУКОВОМ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВБЛИЗИ СТЕНКИ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ КАНАЛА	53
М.М. Гончаров, М.О. Кучинский, А.Н. Кондрашов ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ НАГРЕВАТЕЛЯ КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ	54
М.М. Гончаров, М. В. Козлов, О.О. Фатталов ДИНАМИКА ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ НАХОДЯЩИХСЯ В ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДЕГАЗАЦИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	55
Н.В. Горохова МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗ – ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВИДЕ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ	56
Н.В. Горохова РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	57
Н.В. Горохова ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ НА ТЕЧЕНИЕ СМЕСИ ГАЗ – ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВИДЕ ПЛОСКОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ	58
Г.В. Гусак О СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПЕРИФЕРИИ КОЛЕСА	59
Н. П. Дорофеев, Н. В. Наумова ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ФЕРМ	60
Е.М. Дымнич, Е.С. Емельянова, В.А. Романова МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	61
А.В. Евграфова, А.Н. Сухановский ТЕПЛООБМЕН В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОГО ЛАНДШАФТА	62
Е.С. Емельянова, В.А. Романова МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТИТАНЕ	63
Ю.С. Зайко, А.Г. Куликовский АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ	64
Ю.С. Зайко ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕВАЛА В ЗАДАЧЕ ОБ АСИМПТОТИКЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА СКЛОНЕ	65

Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, Л.А. Гавирова, В.Д. Салова ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНОГО УСТРОЙСТВА, ФОРМИРУЮЩЕГО ДЛИННУЮ ЛАМИНАРНУЮ СТРУЮ, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЧИСТОЙ ЗОНЫ	66
Н.А. Зверев, А.В. Земсков НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА МЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕЛ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ	67
А.Г. Здитовец, А.И. Леонтьев, Ю.А. Виноградов, Н.А. Киселёв, С.С. Попович ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА	68
В.К. Зимичев, А.И. Кобрин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ АППАРАТОМ	69
А.А. Зобова ПРИМЕРЫ АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ	70
О.О. Иванов, А.Б. Подопросветова КОЛЕБАНИЯ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА В РЕЗОНАНСНЫХ УСЛОВИЯХ ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	71
О.О. Иванов, А.Б. Подопросветова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	72
А.А. Адамов, А.А. Каменских, А.П. Панькова АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ	73
А.А. Каменских, А.Д. Пушкарева ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЗУБНЫХ ШИН С ПРОСЛОЙКАМИ РАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИИ	74
А.А. Адамов, А.А. Каменских, Ю.О. Носов О ДЕФОРМАЦИОННОМ ПОВЕДЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	75
У.П. Карасева, Р.М. Бикбаев, Н.Н. Реснина, С.П. Беляев, I.A.Palani, SS. ManiPrabhu, M. Manikandan, S. Jayachandran ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОГО ОБРАЗЦА СПЛАВА $TiNi$, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ WAAM	76
А.Б. Айрапетов, А.В. Катунин, В.В. Стрекалов ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕЖДУ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНОЙ И НЕПОДВИЖНЫМ ЭКРАНОМ НА СТЕНДЕ ПРЯМОГО ДВИЖЕНИЯ	77
А.В. Катунин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛЕСНОЙ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ НАД НЕПОДВИЖНЫМ ЭКРАНОМ	78
А.Б. Айрапетов, А.В. Катунин, В.В. Стрекалов ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИОННО-ГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ В ИССЛЕДОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ТЕЧЕНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДАХ ПРЯМОГО И ОБРАЩЁННОГО ДВИЖЕНИЯ	79
В.М. Кац, В.А. Морозов ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	80
В.М. Козлов, А.Д. Алтухов, Т.С. Киреева, Е.А. Франц ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ОТРЫВ ВИХРЕЙ ДУХИНА ПРИ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	81
А.А. Буров, И.И. Косенко, А.А. Кириенко СУЩЕСТВОВАНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛОЖЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ СПУТНИКА С ПЕРЕМЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАСС	82

В.А. Кобзев, Н.Г. Чеченин, К.А. Букунов, Е.А. Воробьева, А.В. Макунин ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО РАЗРЫВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ	83
М. В. Козлов, К. А. Рыбкин, М. О. Кучинский, Т. П. Любимова ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ВОДЕ И РАСТВОРАХ NaCl	84
А.В. Копьев, А.С. Ильин, В.А. Сирота, К.П. Зыбин ПАРНЫЙ КОРРЕЛЯТОР В ЗАДАЧЕ МАГНИТНОГО ДИНАМО	85
Ю.В. Корнев, Н.А. Семенов, Ю.О. Соляев, Х.Х. Валиев ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА.	86
Е.А. Коровайцева РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗДУВАНИЯ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОЭЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ	87
Е.А. Коровайцева СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ПРЕПОДАВАНИЮ БАЗОВЫХ КУРСОВ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА	88
Е.А. Коровайцева СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОДНОМЕРНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И АЛГОРИТМЫ ИХ РЕШЕНИЯ	89
И.В. Красняков, Д.А. Брацун, Л.М. Писмен МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ	90
И.В. Красняков, Д.А. Брацун МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ – ПРИМЕНЕНИЕ SHEARLET-TRANSFORM ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУР	91
А.А. Кугаевская, К.А. Рыбкин, О.О. Фатгалов, Т.П. Любимова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	92
М.О. Кучинский, К.А. Рыбкин, М.В. Козлов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА	93
Ю.О. Куянова, А.В. Дубовой, А.В. Бервицкий, Д.В. Паршин ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ФУНКЦИЙ СОСУДИСТЫХ АНАСТОМОЗОВ МЕТОДАМИ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА	94
О. А. Логвинов РЕЗОНАНСЫ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ	95
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	96
В.О. Майоров, А.К. Ястребов, В.Ю. Левашов, А.А. Сидоров ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВСКИПАНИЯ И ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЛИ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ	97
В.Г. Лущик, М.С. Макарова ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИНОРОДНОМ ВДУВЕ	98
В.Г. Лущик, М.С. Макарова ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ ГАЗОВ В ТРУБЕ С СИЛЬНЫМ НАГРЕВОМ СТЕНОК	99

А.Н. Максимов ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ МНОГОКРАТНОГО МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ	100
Е.А. Малиновская ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА У ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ	101
Е.А. Малиновская, Д.Р. Малиновский ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО ПЕРЕНОСА В КАНАЛАХ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ У ПОВЕРХНОСТИ И ВЕТРОВОЙ ВЫНОС	102
А.В. Манжурцев, П.Е. Меньшиков, М.В. Ублинский, А.Н. Яковлев КОНЦЕНТРАЦИИ N-АЦЕТИЛАСПАРТИЛГЛУТАМАТА И N-АЦЕТИЛАСПАРТАТА В МОЗГЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ АКТИВАЦИИ ПО ДАННЫМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	103
А.А. Мастерова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА РОТОРА САВОНИУСА	104
А.А. Мастерова МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩИЕ РОТОР САВОНИУСА	105
А.Р. Мещерякова АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗАДАЧАХ КАЧЕНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ С ВЯЗКОУПРУГИМ СЛОЕМ	106
В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Ю.С. Качанов, Д.А. Мищенко РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ПОРОЖДЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА	107
Е.И. Могилевский, А.А. Ипатова, К.В. Смирнов ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЬЖОК НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДИСКЕ	108
Е.А. Мошева, А.И. Мизёв ВЛИЯНИЕ ЗНАКА КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ НА СТРУКТУРУ И ИНТЕНСИВНОСТЬ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВОЙНОЙ ДИФФУЗИИ	109
А.В. Мухин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ ЖЕСТКОГО РОТОРА, ВРАЩАЮЩЕГОСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ	110
В.С. Никитин ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ СИСТЕМ СВОБОДНО ДВИГАЮЩИХСЯ ТЕЛ	111
А.А. Новикова, В.А. Фролов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ БОКОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ПЛОСКОСТЯХ СИММЕТРИИ, И КОРПУСА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ	112
А.П. Новодерова ДИНАМИКА КОРПУСА КОЛЕСНОГО АППАРАТА НА «МИКСТЕ»	113
А.Ш. Осепян, Ф.А. Семин, А.К. Цатурян ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОГО СОКРАЩЕНИЯ В МИОКАРДЕ	114
М. Писарев, Е.С. Емельянова, В.А. Романова РАННИЙ ПРОГНОЗ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОМ ТИТАНЕ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА	115

А.А. Крупнов, М.Ю. Погосбекян МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА КРЕМНЕСОДЕРЖАЩИХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ	116
М.Ю. Погосбекян, А.А. Крупнов ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МРІ И CUDA	117
А.А. Крупнов, М.Ю. Погосбекян, А.Л. Сергиевская ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ-НЕРАВНОВЕСНОЙ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ NO ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ	118
А.В. Подопрсветов, И.А. Орлов ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ С ІMU ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ	119
А.В. Подопрсветов, В.П. Парамонов, И.А. Орлов КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕЙСТВИЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ ВИДЕОПОТОКА	120
А.Б. Подопрсветова ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ ТРУБКИ БЕСКОНЕЧНОЙ И КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ВНУТРИ ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ	121
А.Б. Подопрсветова, В.В. Веденеев ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГОЙ ТРУБКИ	122
Е.И. Понькин ОПИСАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ПОЛИТРОПНОГО ГАЗА С КОСОЙ СТЕНКИ В ВАКУУМ В ПРОСТРАНСТВЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ	123
С.С. Попович, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселев, Ю.А. Виноградов ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА ОБТЕКАНИЯ ПЛАСТИНЫ СВЕРХЗВУКОВЫМ ВОЗДУШНО- КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ	124
С.С. Попович ИЗМЕРЕНИЕ АДИАБАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА, ОБТЕКАЕМОГО СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ СЖИМАЕМОГО ГАЗА	125
С.С. Попович, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселев, Ю.А. Виноградов ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОАЭРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В КАНАЛЕ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ	126
Т.П. Любимова, А.М. Воробьев, С.А. Прокопьев МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫТЕСНЕНИЯ В СЕТИ КАПИЛЛЯРОВ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОЛЯ	127
Д.И. Романова ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОТОКОМ И ВОВЛЕЧЕНИЯ В ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА СКЛОНА	128
Д.И. Романова, С.В. Стрижак МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО ТЕЛА С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ СНЕЖНЫХ КРИСТАЛЛОВ	129
К.А. Рыбкин, О.О. Фатталов, Т.П. Любимова, Л.О. Филлипов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ NaCl И KCl ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ПЛАСТИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	130
Д.А. Рязанов, М.И. Провидухина БИГАРМОНИЧЕСКИЕ АТТРАКТОРЫ	131
И.Н. Солдатов, М.А. Свешникова, Д.А. Симакин ВОЛНЫ В ЦЕНТРИФУГИРОВАННОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ ФЛОТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ, НЕРАВЕНСТВА И СОБСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ ОПЕРАТОРА РОТОР	132

<u>Ф.А. Сёмин, А.Р. Хабибуллина, А.К. Цатурян</u> МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА ПРИ НЕКОТОРЫХ НАСЛЕДСТВЕННЫХ КАРДИОМИОПАТИЯХ	133
<u>Ф.А. Сёмин, А.Р. Хабибуллина, А.Ш. Осепян, А.К. Цатурян</u> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПАССИВНОЙ ЖЁСТКОСТИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА, ВЫЗВАННОГО ЕГО РЕМОДЕЛИРОВАНИЕМ ПРИ КАРДИОМИОПАТИЯХ	134
<u>И.Н. Сибгатуллин, С.А. Елистратов, К.А. Ватугин, Е.В. Ерманюк</u> АККУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ВНУТРЕННИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН В ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕЖИМАХ	135
<u>С.В. Скорюков, А.М. Гуськов</u> ОПТИМИЗАЦИЯ УСИЛИЯ ОСЕВОГО АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА НАСОСА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ	136
<u>Т.В. Стенина, А.В. Иванов</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ В РАМКАХ OPENFOAM® V1912	137
<u>Ф.О. Султанов, И.Б. Быхало, А.А. Левченко</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИИ В ЛАМИНАРНЫХ ПОТОКАХ В СТЕКЛЯННЫХ КАНАЛАХ	138
<u>М.Р. Султанова, И.А. Ремизов</u> РЕГИСТРАЦИЯ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В ОБЪЕМЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫМИ ЗАРЯДАМИ	139
<u>О.Г. Сутырин, П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин</u> ДЕТОНАЦИЯ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ПАДАЮЩЕЙ НА ГАЗОВУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ УДАРНОЙ ВОЛНЫ	140
<u>О.Г. Сутырин</u> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕОДНОРОДНЫХ НЕВЯЗКИХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ	141
<u>О.Ю. Виленский, Д.А. Лапшин, А.М. Татарский</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ ТУРБИНЫ САМОЛЕТА С ТРАНСПОРТНЫМ УПАКОВОЧНЫМ КОМПЛЕКТОМ	142
<u>И.С. Телятников</u> К МОДЕЛЯМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР ЛИТОСФЕРЫ	143
<u>В.В. Терауд</u> ДЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА	144
<u>В.В. Трифонов, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский</u> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В КАНАЛЕ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА	145
<u>В.В. Трифонов, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский</u> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА РАСКРЫТИЯ НА ЯВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В ДИФфуЗОРЕ	146
<u>П.М. Тюбаева, А.А. Ольхов, В.В. Подмастерьев, Э.А. Мамин, А.А. Попов</u> ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ	147
<u>М.В. Ублинский, А.В. Манжурцев, А.Н. Яковлев, Н.А. Семенова, Т.А. Ахадов</u> ВЛИЯНИЕ ИНГИБИТОРОВ PGN-СИНТЕТАЗЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СИГНАЛА BOLD И МЕТАБОЛИЗМ ГЛУТАМАТА В ЗРИТЕЛЬНОЙ КОРЕ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ ВИДЕОСТИМУЛЯЦИИ ПО ДАННЫМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МРТ	148
<u>И.С. Уткин, О.Э. Мельник</u> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА	149

<u>И.С. Уткин, А.А. Афанасьев</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ, ВЫЗВАННЫХ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ	150
<u>Л.Ф. Файзуллин, Р.С. Пикалов</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УВОДА КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА	151
<u>Ю.Б. Фасхутдинова, О.Ю. Сметанников</u> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА	152
<u>Т.П. Любимова, К.А. Рыбкин, О.О. Фатталов</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ВОДА – АМОРФНЫЙ КВАРЦ, ПОКРЫТЫЙ ПАВ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА	153
<u>Т.В. Хоружий, М.С. Алексеев, Д.А. Артюхов, Е.В. Горбачева</u> ОТДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ПРИ ДВИЖЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	154
<u>А.Р. Хабибуллина, Ф.А. Сёмин, А.К. Цатурян</u> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАРУШЕНИЙ СОКРАТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПРОВОДИМОСТИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА	154
<u>В.В. Химуля</u> ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА	156
<u>А.А. Чернова</u> ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКАЧКИ ВОДЫ, УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА, МЕТАНА И ПРОПАНА ДЛЯ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ	157
<u>Т.Н. Чикова, В.М. Тверье, А.А. Киченко</u> БИОМЕХАНИКА ПЕРЕСТРОЙКИ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ	158
<u>Т.Н. Чикова</u> ИЗУЧЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ	159
<u>А.Ю. Чулюнин</u> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКИ В РАМКАХ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ	160
<u>А.Ю. Чулюнин</u> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ГЛУБОКИХ ЛУНОК	161
<u>Р.А. Шавня</u> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЛОПИРОВАНИЯ ПРОВОДОВ С ГОЛОЛЁДОМ	162
<u>Л.Р. Шайдуллин</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АЭРОЗОЛЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В РЕЗОНАТОРЕ	163
<u>Б.Р. Шарифуллин, И.В. Наумов</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЗЫРЕВИДНОГО РАСПАДА ЗАМКНУТОГО ВИХРЕВОГО ПОТОКА НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ	164

ТИПЫ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ В МЕХАНИКЕ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

А.О. Ватульян

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
e-mail: vatulyan@aaanet.ru

Обратные задачи - весьма интенсивно развивающаяся область механики и математической физики. С точки зрения соотношения причина – следствие все задачи математического моделирования можно разбить на два больших класса: **прямые** задачи (ПЗ) (известны причины, необходимо найти следствия) и **обратные** задачи (ОЗ) (известны следствия, необходимо найти причины). В качестве причин могут фигурировать начальные условия, коэффициенты дифференциальных операторов, граничные условия и область, занятая изучаемым объектом. В качестве следствий в механике используются обычно компоненты физических полей (перемещения, скорости, напряжения, деформации, температура).

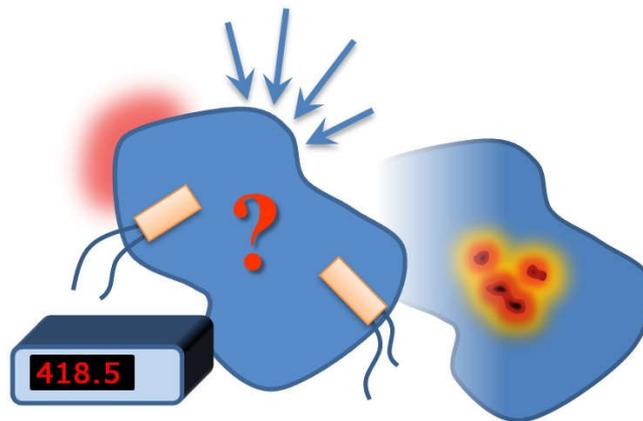
Для ПЗ доказаны теоремы разрешимости и единственности, созданы различные пакеты, реализующие соответствующие вычислительные технологии.

Для ОЗ требуется определить 4 отмеченные причины (либо одну из них) по некоторой дополнительной информации об объекте исследования и по сути осуществить обращение причинно-следственных связей, сформулировать условия, обеспечивающие единственность.

Отметим, что ОЗ имеют постоянно расширяющиеся области приложения в инженерной практике, среди которых выделим: определение свойств материалов -полимеров и композитов, функционально-градиентных материалов, биологических тканей, пьезокерамик; совершенствование технологий неразрушающего контроля (определение расположения и конфигурации дефекта по измеренному полю смещений на поверхности тела или по резонансным частотам); задачи рентгеновской и акустической томографии; распознавание движущихся объектов; определение законов стратификации в океане и другие.

Обсуждены основные типы ОЗ (ретроспективные, граничные, коэффициентные и геометрические), основные трудности при их исследовании (нелинейность, неединственность, некорректность); представлены основные пути преодоления проблем и современные численные схемы для решения различных типов ОЗ

Отметим, что единые подходы к различным типам обратных задач, которые в условной операторной форме сформулированы в [1], и требующие восстановления одной или нескольких функций или параметров, могут быть исследованы лишь на фундаменте общих операторных уравнений и средств функционального анализа.



Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ № 075-15-2019-1928.

1. А. О. Ватульян. Коэффициентные обратные задачи механики. М.: Физматлит, 2019. 272 с.

ИЗНАШИВАНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТ

И.Г. Горячева^{1,2}

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

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

e-mail: goryache@imec.msu.ru

Волокнистые композиционные материалы представляют собой матрицу с расположенными в ней волокнами, которые, как правило, отличаются по своим механическим и прочностным характеристикам от свойств матрицы. Примером таких материалов являются углерод-углеродные композиты (углеродные волокна расположены в углеродной матрице), которые используются при изготовлении тормозных дисков.

Излагаются методы расчета [1] скорости изнашивания и формы изношенной поверхности в установившемся режиме, изучается влияние структурных характеристик композита на форму его изношенной поверхности (рис.1) и эффективную скорость изнашивания. Приводится модель для изучения условий вырывания волокон с поверхности композита в условиях контактного взаимодействия, позволяющая проанализировать влияние свойств промежуточного слоя между волокном и матрицей на прочностные характеристики поверхностных слоев композита в условиях фрикционного взаимодействия.

Результаты моделирования сравниваются с результатами лабораторных испытаний на трение и изнашивания волокнистых углерод-углеродных композитов, которые проводятся в лаборатории трибологии Института проблем механики РАН с использованием разработанных методик трибологических испытаний, сопровождающихся анализом поверхности трения с использованием электронной и сканирующей зондовой микроскопии.

Результаты исследования могут быть использованы при конструировании и выборе технологии изготовления волокнистых композиционных материалов.

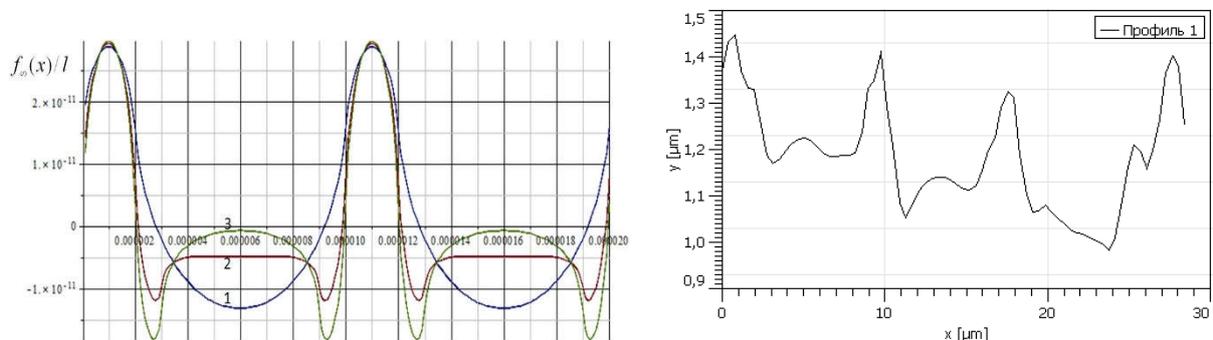


Рис.1. Расчетные формы изношенной поверхности композитов с различными свойствами структурных элементов и профилограмма изношенной поверхности трения волокнистого углерод-углеродного композита.

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
2. I.Goryacheva, Yu.Makhovskaya. Modeling of Fiber Composite Wear//In "Advances in the Field of Dynamics of Complex Structures", Springer, 2020

ОБОБЩЕННЫЕ ДИАГРАММЫ СМЕЙЛА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К КАЧЕСТВЕННОМУ АНАЛИЗУ ДИССИПАТИВНЫХ СИСТЕМ С СИММЕТРИЕЙ

А.В. Карапетян¹

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

Обсуждается проблема качественного анализа динамики диссипативных механических систем с симметрией на основе обобщенных диаграмм Смейла. Классическая теория Смейла [1] разработана для консервативных механических систем с симметрией. Такие системы допускают интеграл энергии и интегралы Нетер. Критические уровни интеграла энергии на фиксированных уровнях интегралов Нетер образуют в пространстве констант этих интегралов бифуркационное по Смейлу множество. На этом множестве происходят перестройки топологического типа областей возможности движения системы. Очевидно, все точки пространства констант интегралов инвариантны относительно фазового потока системы.

В лекции обсуждается проблема распространения теории Смейла на случай диссипативных механических систем с симметрией [2,3]. В этом случае энергия не возрастает вдоль движений системы. Показано, что критические уровни начального значения энергии на фиксированных уровнях интегралов Нетер по-прежнему задают в пространстве этих постоянных (начальное значение энергии и постоянные интегралов Нетер) бифуркационное по Смейлу множество. Для неконсервативного случая, в отличие от классического случая консервативных систем, инвариантны относительно фазового потока только точки, лежащие на бифуркационном по Смейлу множестве. Все остальные точки эволюционируют вдоль подпространства постоянных интегралов Нетер в сторону уменьшения энергии, асимптотически приближаясь к бифуркационному по Смейлу множеству. Таким образом, обобщенные диаграммы Смейла позволяют находить множество предельных движений диссипативных систем с симметрией по начальному значению энергии системы и значениям интегралов Нетер. Общие результаты иллюстрируются на примерах построения диаграмм Смейла как для консервативных (гироскоп в кардановом подвесе [4]), так и для неконсервативных (волчок тип-топ [3]) систем.

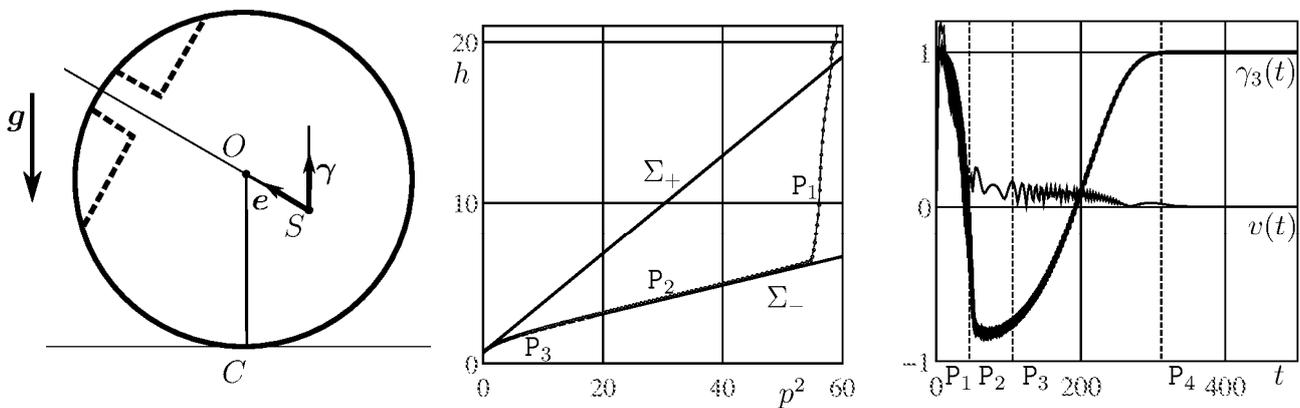


Рис. Волчок тип-топ. Диаграмма Смейла. Переворот волчка.

1. Смейл С. Топология и механика. Успехи мат. наук. 1972. Т.27. №2. С. 77-120
2. Карапетян А.В. Устойчивость стационарных движений. М.: Эдиториал УРСС. 1998.
3. Карапетян А.В. Глобальный качественный анализ динамики диссипативных систем с симметрией на основе обобщенных диаграмм Смейла. В сб. «Современные проблемы математики и механики» – М.: МГУ. 2009. Т.2. Механика. Вып.2.
4. Карапетян А.В., Чаплыгина М.П. Бифуркационный анализ динамики гироскопа в кардановом подвесе. Вестник МГУ. Сер.1. Мат.Мех. 2019. №3. С.73-76.

ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ – РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю.С. Качанов¹, В.И. Бородулин¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
e-mail: kachanov@itam.nsc.ru

Введённый нами около 15 лет назад термин «детерминированная турбулентность» (ДеТу) относится к постпереходному погранслоному течению, которое выглядит как турбулентное (в соответствии с общепринятой точкой зрения, хотя она и нечётко определена), но обладает сильной степенью детерминированности. Такой тип турбулентности может возникать в пограничных слоях, в которых переход вызван конвективными типами неустойчивости. Первая экспериментальная реализация ДеТу была осуществлена около двенадцати лет назад [1, 2]. Последующие эксперименты (выполненные в Новосибирске и Лондоне) подтвердили возможность реализации ДеТу и показали огромные методические возможности этого подхода для изучения, как свойств турбулентных потоков, так и результатов различных внешних воздействий на мгновенную структуру турбулентности. Однако ряд важных аспектов проблемы исследования ДеТу оставался долгое время не изученным.

В частности, не было однозначного ответа на основной вопрос. «Точно ли соответствует ДеТу обычной случайной турбулентности?» При положительном ответе на этот вопрос, статистические свойства ДеТу (такие, как профили средней скорости, профили амплитуд пульсаций, спектры пульсаций, и др.) не должны зависеть от конкретной мгновенной реализации детерминированного турбулентного потока. Этот аспект проблемы был недавно подробно исследован [3] и обсуждается в настоящем докладе. Другой важный вопрос – о степени детерминированности, т.е. многократной воспроизводимости, мгновенной структуры ДеТу оставался также открытым. Недавние исследования привели, в частности, к обнаружению удивительного свойства пристенной турбулентности – универсального экспоненциального нарастания некогерентных компонент течения [3, 4].

Обсуждению этих и других свойств ДеТу, а также демонстрации огромных возможностей метода ДеТу при исследовании пристенной турбулентности и посвящён данный обзорный доклад. В докладе представлены результаты анализа свойств вихревых структур, возникающих в экспериментах в двумерном, первоначально ламинарном, пограничном слое с умеренным неблагоприятным продольным градиентом статического давления. В одной серии измерений вихревые структуры, типичные для турбулентного пограничного слоя воспроизводились многократно путём точного воспроизведения начальных контролируемых возмущений – волн Толлмина-Шлихтинга (ТШ) широкого частотно-волнового спектра. Возникновение и эволюция этих структур, и постепенное нарастание степени невоспроизводимости их свойств, тщательно исследовано. В другой серии измерений подробно изучена степень воспроизводимости статистических характеристик ДеТу при изменении мгновенной структуры турбулентности, создаваемой путём варьирования начального частотно-волнового спектра волн ТШ, генерируемых в пограничном слое. В докладе также показано, как метод ДеТу позволяет изучать воздействие внешних факторов на мгновенную структуру пристенной турбулентности. Этот подход позволил прояснить механизм снижения вязкого трения на стенке при помощи устройств разрушения крупных вихрей (LEBU), изучавшихся в ряде предшествующих экспериментов. Несмотря на широкую известность этих устройств, механизм их воздействия на поток был окончательно выяснен только после применения метода ДеТу [5].

Работа поддержана Программой фундаментальных научных исследований Российских академий наук в 2013-2020 гг. (проект № АААА-А17-117030610128-8).

1. Borodulin V.I., Kachanov Y.S. and Roschektayev A.P. The deterministic wall turbulence is possible // *Advances in Turbulence XI. Proceedings of 11th EUROMECH European Turbulence Conference, June 25–28, 2007, Porto, Portugal* / J.M.L.M. Palma and A. Silva Lopes, eds. – Heidelberg: Springer, 2007, pp. 176–178.

2. Borodulin V.I., Kachanov Y.S. and Roschektayev A.P. Experimental detection of deterministic turbulence // *Journal of Turbulence*. 2011. – Vol. 12, No 23. pp. 1–34.

3. Borodulin V.I., Kachanov Y.S. On the reproducibility of instantaneous and statistical characteristics of the deterministic turbulence // *Theoretical and Applied Mechanics Letters* // 2014. – Vol. 4, 062004.

4. Borodulin V.I., Kachanov Y.S. Experimental Study of Reproducibility of Instantaneous Structure of the Deterministic Wall Turbulence // *Proceedings of 8th Intl. Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena - TSFP-8. E.N.S.M.A. Poitiers, France, 2013*, pp. 1–6.

5. V.I. Borodulin, Y.S. Kachanov, A.P. Roschektayev Application of the deterministic turbulence method to study of LEBU-device mechanism // *Advances in Turbulence XII. Springer Proc. Phys. 132, Proc. 12th Eur. Turbulence Conf., September 7–10, 2009, Marburg, Germany* / B. Eckhardt, ed. - Berlin: Springer, 2009, pp. 313–316.

УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ НЕОДНОРОДНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ВИБРАЦИЙ

Т.П. Любимова^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

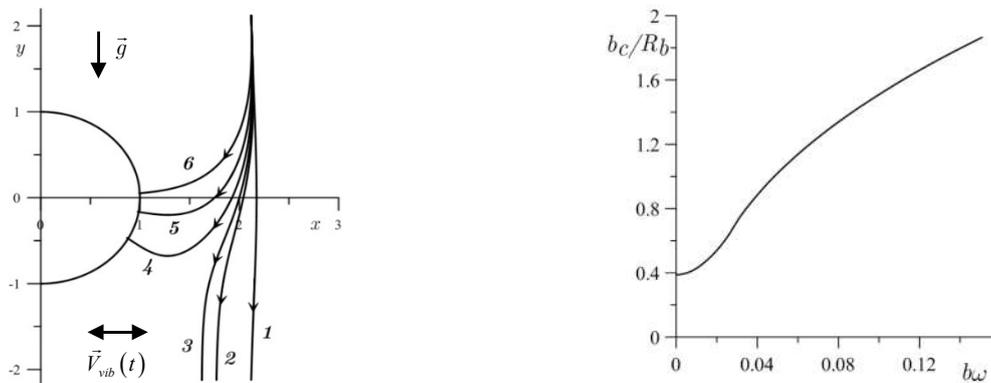
²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: lyubimovat@mail.ru

Вибрации оказывают значительное влияние на поведение неоднородных по плотности гидродинамических систем. Вертикальные вибрации достаточно высокой интенсивности могут стабилизировать состояния равновесия двухслойных систем в гравитационном поле, в которых более плотная жидкость расположена над менее плотной, а горизонтальные вибрации могут приводить к новым устойчивым состояниям равновесия с наклонной или даже вертикальной границей раздела жидкостей [1]. Это позволяет рассматривать вибрации как очень простой и низкоэнергетический метод управления поведением неоднородных гидродинамических систем.

В настоящем докладе анализируются экспериментальные, аналитические и численные результаты по влиянию вибраций разного типа на поведение неоднородных по плотности сред. Первая часть доклада посвящена воздействию вибраций на поверхности раздела несмешивающихся и смешивающихся жидкостей. Рассмотрены механизмы неустойчивости поверхностей раздела жидкостей в вибрационных полях и методы управления поведением систем с поверхностями раздела жидкостей с помощью вибраций. Обсуждаются результаты применения вибраций для управления кризисом кипения и течениями и тепломассопереносом при выращивании кристаллов из расплава различными методами.

Вторая часть доклада посвящена влиянию вибраций на поведение жидкостей с газообразными, жидкими и твердыми включениями, суспензий и эмульсий. Анализируются резонансные колебания пузырьков и капель в колеблющейся жидкости и динамика капли на колеблющейся твердой подложке при вибрациях конечной частоты и вызванная высокочастотными вибрациями средняя деформация включений. Обсуждаются средние вибрационные силы, действующие на газообразные, жидкие и твердые включения в невязких и вязких жидкостях и формирование периодических структур в суспензиях и эмульсиях, а также применение акустических и неакустических вибраций для управления процессами разделения фаз, включая флотацию [2].



Влияние акустических вибраций на траектории движения твердой частицы в окрестности всплывающего в жидкости пузырька (слева) и на эффективность столкновения частицы с пузырьком (справа).

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, Соглашение № С-26/788).

1. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. – М.: Физматлит, 2003, 216 с.

2. Lyubimov D.V., Klimenko L.S., Lyubimova T.P., Filippov L.O. The interaction of a rising bubble and a particle in oscillating fluid. Journal of Fluid Mechanics. 2016, Vol.807, pp. 205-220.

ФОКУСИРОВКА ЭНЕРГИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Р.И. Нигматулин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: nigmar@ocean.ru

Изложены экспериментальные и теоретические основы так называемого пузырькового термояда.

В эксперименте при температуре около 0°C в центре цилиндрической колбы с дейтерированным ацетоном при резонансной частоте 20 кГц и сфокусированном акустическом воздействии создается кавитационный сферический кластер диаметром $\sim 10^{-2}$ м из сферических пузырьков. Под действием акустического поля эти пузырьки совершают объемные осцилляции с острым коллапсом в стадии сжатия. Около 50 акустических осцилляций кластер сохраняет окосферическую форму. В стадиях коллапсов кластер излучает с частотой $\sim 2000\text{ с}^{-1}$ импульсы быстрых нейтронов (2,5 МэВ). Производительность нейтронов $\sim 10^6\text{ с}^{-1}$. Параллельно с этой же производительностью идет образование ядер трития, что соответствует термоядерной реакции $\text{D} + \text{D}$.

Численное исследование показало, что в центральных пузырьках кластера с паром достаточно большой молекулярной массы в стадии коллапса образуются сходящиеся к центрам пузырьков сферические ударные (микроударные) волны, которые фокусируют энергию в центрах пузырьков. Во время отражения этих ударных волн от этих центров образуются экстремальные сферические (нано-сферические) зоны. Эти зоны имеют размер $\sim 10^{-7}$ м, температуру $\sim 10^8\text{ K}$, плотность $\sim 10^4\text{ кг/м}^3$ в течение $\sim 10^{-12}$ с. За это время в такой нано-сферической зоне образуется ~ 10 термоядерных нейтронов и ядер трития.

Парадоксально, но именно кластерная (а не стримерная) кавитация и достаточно высокая молекулярная масса пара (что обеспечивает в паре низкую скорость звука) D -ацетона $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$ (молекулярная масса $M = 64$, показатель адиабаты $\gamma = 1,125$) по сравнению, например, с паром дейтерированной воды D_2O в условиях наших экспериментов являются необходимыми условиями образования сходящихся сферических микроударных волн. Именно эти волны создают достаточную для термоядерных актов фокусировку энергии в нано-сферических зонах около центров пузырьков.

Аномальная фокусировка приводит к образованию наноалмазов в пузырьках в бензоле и толуоле при воздействии на них ударными волнами большой амплитуды (~ 100 бар).

Показано, что более подходящими для реализации сильного сжатия среды в коллапсирующем паровом пузырьке посредством сходящихся ударных волн являются жидкости с большой молекулярной массой и малым показателем адиабаты пара. По этим параметрам детерированный ацетон $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$ существенно превосходят воду, а бензол несколько предпочтительнее ацетона. Радикально более предпочтительней, чем бензол, является тетрадекан $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ ($M = 198$, $\gamma = 1.0265$). Расчеты показали также, что ударные волны в пузырьках в тетрадекане могут образовываться при намного более высоких температурах жидкости, чем в случаях ацетона и бензола, для которых температура жидкости должна была быть около 0°C .

Возможность сверхсжатия содержимого пузырька в тетрадекане при высоких температурах около 400°C является определенным преимуществом, если рассматривать рассматриваемое явление как перспективу получения энергии за счет термоядерной реакции в центре пузырьков. Большое значение имеет большая устойчивость сферически симметричной фокусировки в пузырьках с паром с большей молекулярной массой.

Последние исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (№17-11-01135).

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЫЗВАННАЯ ВХОДНЫМ ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ

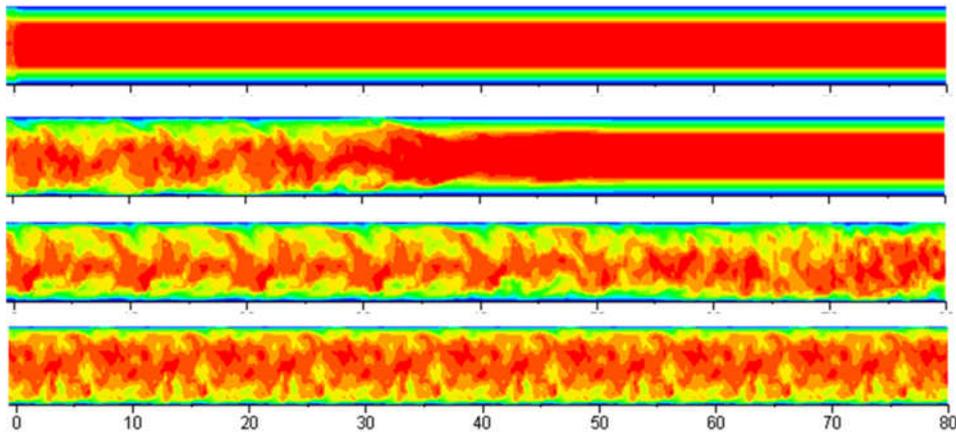
Н.В. Никитин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: nvnikitin@mail.ru

Турбулентные течения характеризуются пульсациями гидродинамических полей со случайным поведением, как во времени, так и в пространстве. При численном моделировании пространственно развивающихся течений в рамках уравнений Навье-Стокса требуется задание некоторого поля скорости во входном сечении в каждый момент времени. Например, в трубах входное течение можно задавать в виде суперпозиции равномерного потока либо течения Пуазейля и некоторого нестационарного возмущения. Развитие возмущения вниз по потоку при достаточно больших числах Рейнольдса приводит в конечном итоге к установлению развитой турбулентности с постоянными по длине трубы средними характеристиками. В зависимости от вида входных условий для установления течения может потребоваться значительная длина в несколько десятков или даже сотен калибров. Для ускорения выхода течения на установившийся режим предложено несколько стратегий формирования нестационарного входного потока со случайными во времени пульсациями и частотными характеристиками близкими к характеристикам развитой турбулентности. Предполагается, что чем ближе распределение по сечению трубы частотного состава пульсаций на входе к установившемуся течению, тем быстрее (на меньшей длине) будет достигаться установление. Отметим, что пространственные (по длине трубы) формы развивающегося течения никак при этом не прогнозируются. Бытует неявное предположение, что случайные во времени пульсации вызывают случайные же распределения в пространстве.

В докладе будет показано, что предположение о неминуемой пространственной случайности пространственно развивающегося турбулентного течения ошибочно. Аналитически построен алгоритм формирования входных граничных условий, дающих установившееся по длине трубы строго периодическое турбулентное течение с заранее заданным периодом [1]. Средние характеристики в этом течении на всей длине, начиная с входного сечения, постоянны и согласуются со всеми хорошо установленными экспериментальными данными.



Замещение исходно ламинарного течения Пуазейля в трубе пространственно-периодическим турбулентным течением с периодом $L=10$ под действием входных возмущений, $Re=4000$. Поле продольной компоненты скорости в последовательные моменты времени. Течение слева направо.

Численно показано, что хотя построенное решение неустойчиво, и возмущения экспоненциально нарастают вниз по потоку, отклонение от чистой периодичности может оставаться на уровне менее 1% на длинах до 100 радиусов трубы.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке гранта РФФИ № 18-71-10075.

1.Nikitin N. Spatial periodicity of spatially evolving turbulent flow caused by inflow boundary condition // Phys. Fluids. 2007. V. 19. № 9. P. 091703(4).

ДИНАМИКА ДВУХЗВЕННОГО МАЯТНИКА

В.А. Самсонов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: samson@imec.msu.ru

Однозвенный аэродинамический маятник – флюгер (рис. 1а) – чем-то похож на своего классического собрата – маятника физического (рис. 1б).

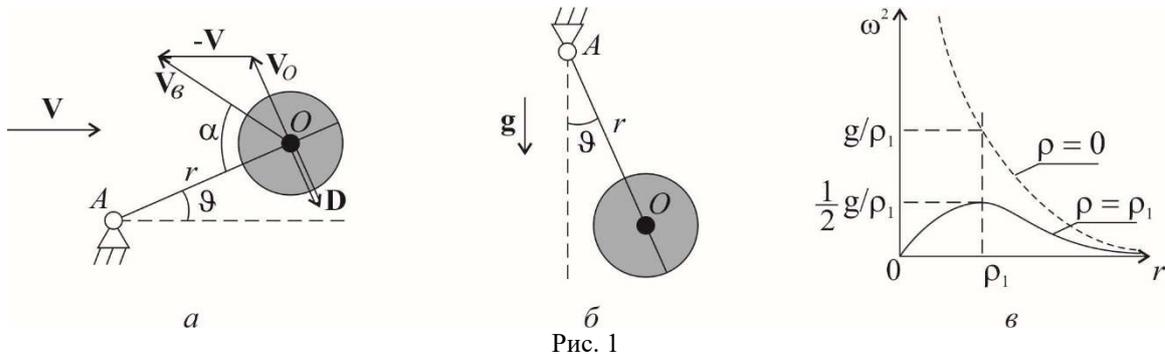


Рис. 1

Уравнения движения этих объектов схожи, положения равновесия одинаковы $\vartheta_1 = 0$, $\vartheta_2 = \pi$, и даже характер их устойчивости совпадает. Однако динамические свойства систем различны. Это видно по структуре уравнений.

$$(mr^2 + J_o)\ddot{\vartheta} = -rdV_o^2 \sin \alpha, \quad V_o \cos \alpha = V \cos \vartheta, \quad V_o \sin \alpha = V \sin \vartheta + r\dot{\vartheta}; \quad (1)$$

$$(mr^2 + J_o)\ddot{\vartheta} = -mgr \sin \vartheta, \quad J_o = mr^2. \quad (2)$$

Уравнения движения аэродинамического маятника имеют вид (1), а уравнение движения физического маятника – вид (2). В (1) можно формально устремить к нулю коэффициент при старшей производной и получить уравнение «медленного» движения $r\dot{\vartheta} + V \sin \vartheta = 0$.

Для (2) невозможно выполнить аналогичное действие. И, вообще, физический маятник не богат на разнообразии свойств. Например, его фазовый портрет качественно не изменяется при варьировании параметров. Единственная интересная особенность – немонотонная зависимость частоты ω его малых колебаний от параметра r : $\omega^2 = gr / (\rho^2 + r^2)$ (рис. 1в).

Иное дело флюгер, особенно, если вместо круглого тела использовать, например, тонкий профиль. Тут возможны и новые равновесия, и автоколебания, и даже авторотации [1].

Интересно провести подобное сравнение на двухзвенных маятниках. Ведь такой объект даже в однородном поле тяжести обладает экзотическими типами движений. В N-том году мы увидели, что и аэродинамический маятник тоже способен на экзотику [2].

В (N+10)-ом году мы начали систематическое аналитическое и экспериментальное изучение динамики двухзвенного аэродинамического маятника как ветроприемного элемента энергетического устройства. Некоторые результаты изложены в лекции. Обсуждаются аналогии и различия в поведении двухзвенных маятников физического и аэродинамического. Демонстрируются результаты натуральных экспериментов и проводится сравнение с численным моделированием. Дана оценка области применимости квазистатической модели аэродинамического воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 17-08-01366, 18-01-00538).

1. Локшин Б.Я., Самсонов В.А. Задача о движении тела в сопротивляющейся среде. Качественный анализ. – М.: Изд-во МГУ. 2012. 237 с.

2. Герценштейн С.Я., Досаев М.З., Некрасов И.В., Самсонов В.А. Двухзвенный флюгер в потоке воздуха. Задача практикума по механике. / Под редакцией академика РАН Г.Г. Черного. – М.: Изд-во МГУ. 2004. 18 с.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ СВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ МЕХАНОХИМИИ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

А.Б. Фрейдин^{1,2,3}

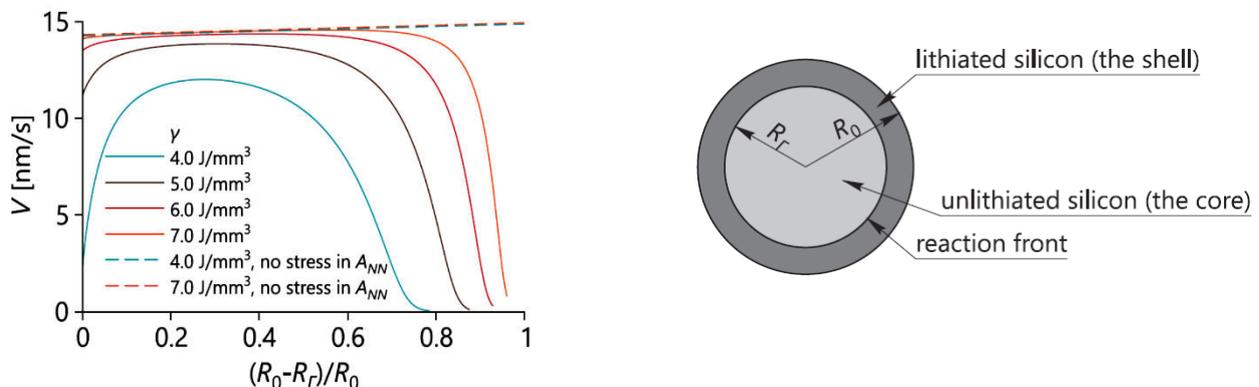
¹Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

e-mail: alexander.freidin@gmail.com

Установление взаимосвязей между химическими реакциями и процессами деформирования и разрушения важно как с точки зрения фундаментальной науки, так и инженерных приложений. В докладе рассматриваются химические реакции между деформируемым твердым и диффундирующим компонентами. Обсуждается постановка связанных задач «диффузия – химия – механика». Влияние напряжений на скорость фронта химической реакции исследуются на основе использования тензора химического сродства (см. обзорную статью [1]). Показывается, что нормальная составляющая тензора сродства играет роль конфигурационной силы, движущей фронт. Формулируется кинетическое уравнение в виде зависимости скорости фронта реакции от нормальной компоненты тензора сродства, зависящего в свою очередь от напряжений и концентрации диффундирующего компонента. Приводятся постановки и решения связанных краевых задач механохимии для случаев упругих и неупругих компонентов реакции. Демонстрируется, что напряжения могут ускорять, замедлять и блокировать распространение фронта (см., напр., [2]). Строятся запретные зоны, образованные деформациями, при которых фронт реакции не может распространяться [3]. Исследуется устойчивость фронта реакции и показывается, что потеря устойчивости фронта может быть причиной последующего разрушения. Обсуждаются применения развитого подхода к описанию процессов окисления кремния в микроэлектронике, литизации кремния в литий-ионных батареях, формирования интерметаллидов в бессвинцовых припоях.



Литизация кремниевой сферической частицы: зависимость скорости фронта литизации от относительной толщины литизированного слоя при различных химических энергиях без учета влияния напряжений (пунктиры) и с учетом влияния напряжений (сплошные линии, эффект замедления фронта) [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 19-19-000552.

1. Freidin A.B., Vilchevskaya E.N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: Encyclopedia of Continuum Mechanics. Altenbach H., Ochsner A. (eds), Springer, Berlin, Heidelberg, 2020, doi:10.1007/978-3-662-53605-6_143-1

2. Poluektov M., Freidin A.B., Figiel L. Modelling stress-affected chemical reactions in non-linear viscoelastic solids with application to lithiation reaction in spherical Si particles // Int. J. of Engineering Science. 2018. Vol. 128, pp. 44-62.

3. Freidin A.B., Sharipova L.L. Forbidden strains and stresses in mechanochemistry of chemical reaction fronts. In: Generalized Models and Non-classical Approaches in Complex Materials 1, 2018, pp. 335-348 (Advanced Structured Materials Vol. 89, Springer)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

М.А. Шеремет

Томский государственный университет, Томск

e-mail: sheremet@math.tsu.ru

Конвективный теплоперенос как один из механизмов переноса энергии встречается во многих технических и природных системах [1–5]. Изучение этого явления необходимо как для понимания физических особенностей процесса, так и для создания или оптимизации инженерных систем, в которых этот механизм переноса энергии является доминирующим. К таким системам относятся теплообменные устройства, солнечные коллекторы, элементы строительной застройки, трубопроводы, системы охлаждения тепловыделяющих элементов в электронной технике, установки для выращивания монокристаллов и многие другие. Принимая во внимание широкий спектр приложений рассматриваемого явления, изучение этого процесса проводится как на основе экспериментальных исследований, так и с использованием методов математического моделирования.

В рамках предложенного доклада будут рассмотрены численные подходы к математическому моделированию свободно-конвективного теплопереноса в замкнутых областях при наличии локальных источников энергии в двумерной и трехмерной постановках (см. рис. 1) [5–9]. Для математического описания конвективного теплопереноса используются уравнения Обербека–Буссинеска, сформулированные на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность» в двумерном случае и «векторный потенциал – вектор завихренности» или «скорость – вектор завихренности» в трехмерном случае. Такой численный подход позволяет существенно сократить вычислительное время при решении двумерных задач, вследствие уменьшения количества уравнений, в случае же пространственных задач также наблюдается снижение вычислительного времени [6].

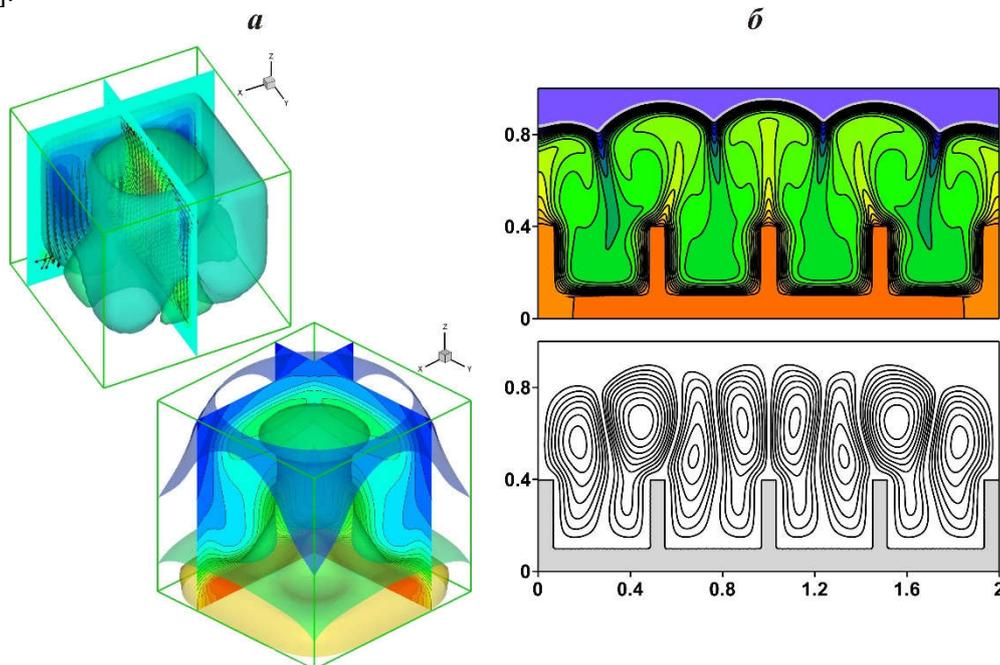


Рис. 1. Поля скорости и температуры в кубической полости (а), изолинии температуры и функции тока в области с радиаторной системой (б).

Рассматриваемые вычислительные подходы будут проиллюстрированы на следующих примерах:

- конвективно-радиационный теплоперенос в замкнутых областях при наличии тепловыделяющих элементов в ламинарном и турбулентном приближениях [5–9];
- естественная конвекция и поверхностное излучение в дифференциально-обогреваемой кубической полости (см. рис. 1а) [6, 7];
- конвективное плавление материала с изменяемым фазовым состоянием внутри полости при наличии тепловыделяющего элемента и радиаторной системы (см. рис. 1б) [8, 9].

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

1. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983. 400 с.
2. Соковишин Ю.А., Мартыненко О.Г. Введение в теорию свободно-конвективного теплообмена. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. 224 с.
3. Bejan A. Convection heat transfer. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 694 p.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. 288 с.
5. Shenoy A., Sheremet M., Pop I. Convective flow and heat transfer from wavy surfaces: viscous fluids, porous media and nanofluids. Boca Raton: CRC Press, 2016. 306 p.
6. Бондарева Н.С., Гибанов Н.С., Мартюшев С.Г., Мирошниченко И.В., Шеремет М.А. Сравнительный анализ методов конечных разностей и контрольного объема на примере решения нестационарной задачи естественной конвекции и теплового излучения в замкнутом кубе, заполненном диатермичной средой // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 4. С. 567–578.
7. Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A. Turbulent natural convection heat transfer in rectangular enclosures using experimental and numerical approaches: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. pp. 40–59.
8. Bondareva N.S., Sheremet M.A. 3D natural convection melting in a cubical cavity with a heat source // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Vol. 115. pp. 43–53.
9. Бондарева Н.С., Шеремет М.А. Численное исследование влияния формы радиатора на теплообмен в системе, содержащей парафин // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10, № 1–2. С. 37–46.

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК И ИСПЫТАНИЙ СВЕРХЛЕГКОГО САМОЛЕТА

И.А. Амелюшкин^{1,2}, О.В. Дружинин², А.В. Усов²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская область
e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Создание сверхлегких пилотируемых летательных аппаратов представляет практический интерес с точки зрения быстрой, безопасной и экономичной транспортировки грузов и человека.

Разрабатываемый сверхлегкий бесфюзеляжный самолет содержит несущую поверхность, стабилизатор, подвесную систему, систему управления и воздушный винт, отличается тем, что дополнительно содержит балку, крепящуюся к крылу и стабилизатору, четное количество расположенных на несущей поверхности электродвигателей с воздушными винтами, стропы, которые связывают несущую поверхность и балку с подвесной системой, на которой также расположен источник энергии, модуль дистанционного управления и электрическая трансмиссия, связывающая источник энергии с электродвигателями.

Уменьшение размеров летательных аппаратов ограничена размерами и весом летчика и превращает самолет по сути в некое подобие летательного костюма (рис. 1 вверху). Подготовлен обзор известных аналогов, показаны преимущества и области применения разрабатываемого летательного аппарата: например, экономичный и доступный личный транспорт, военные приложения, эвакуация, поисково-спасательные работы, перевозка грузов и оборудования широкого спектра назначения. Проектируемый самолет не требует аэродрома, обладает малым весом (40–45 кг), возможностью разборки для перевозки в личном и в общественном транспорте. Винтовая схема обеспечивает экономичность, дальность и продолжительность полета, при этом шум значительно ниже в отличие от реактивных аналогов.

Оригинальная аэродинамическая компоновка обеспечивает низкие затраты электроэнергии двигателей при полном отсутствии вредных выбросов в атмосферу. Модификация аппарата для военных приложений обеспечивает высокую скорость, точность и низкую заметность. Статическая устойчивость в горизонтальном полете дает возможность пилоту освободить руки и использовать их для управления другими действиями. На рис. 1 внизу и в центре представлены результаты расчета зависимости подъемной силы летательного аппарата с крыльями различных конфигураций от скорости полета. Видно, что геометрия 10 обеспечивает достаточную подъемную силу при влете и посадке со скоростью 30–35 км/ч, которую можно снизить за счет применения разработанного ранее адаптивного крыла [3].

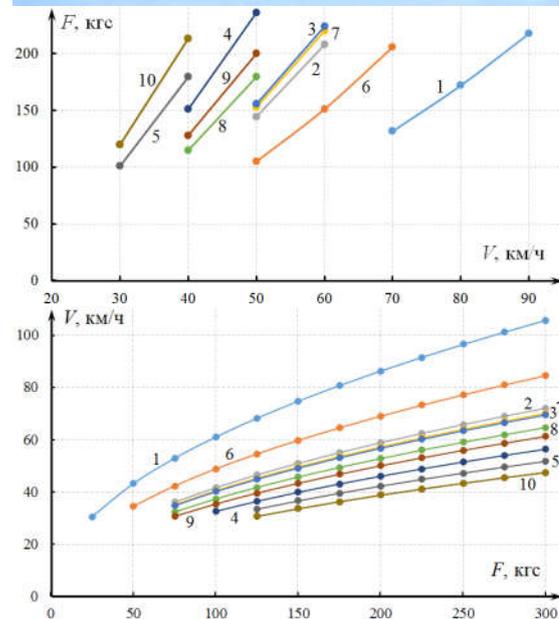


Рис. 1. Вверху – одна из первых исследуемых в работе компоновок разрабатываемого сверхлегкого самолета; в центре зависимость подъемной силы от скорости взлета/посадки, внизу зависимость подъемной силы от скорости полета.

1. Брусов В.С., Петручик В.П., Морозов Н.И. Аэродинамика и динамика полета малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / Под ред. В.С. Брусова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 340 с.

2. Макаров Ю.В. Микросамолет: Патент RU 93 026 059 А от 05.05.1993.

3. Дружинин О.В. Адаптивная аэродинамическая поверхность // Патент на изобретение Ru 2 657 062 С1 от 06.07.2017.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЬДОФОБНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

И.А. Амелюшкин

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Использование гидрофобных покрытий представляет интерес в широкой области технических и бытовых приложений, в частности в задачах противодействия обледенению летательных аппаратов. Гидрофобные поверхности обладают своеобразными функциональными свойствами, к которым следует отнести водонепроницаемость, стойкость к коррозии, устойчивость к биообрастанию, к неорганическим, а в ряде случаев и к органическим загрязнениям. Благодаря многообразию управляемых свойств создание гидрофобных тел в настоящее время интенсивно развивается. Такие покрытия, как правило, эффективно работают при незначительных числах Вебера, рассчитанных по характерным размерам H рельефа поверхности $We = H\rho V^2/\sigma$, (ρ – плотность жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, V – скорость удара капли). Однако при превышении поверхностной плотности кинетической энергии (переохлаждённой капли) некое критического значения, льдофобные свойства приводят к отрицательным эффектам ввиду проникновения жидкости в углубления и застывания в них. В случае динамического воздействия свойства гидрофобных/льдофобных покрытий определяются коэффициентами отскока капель в зависимости от числа Вебера

$$\alpha(We) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{a_n^2(\beta) + a_\tau^2(\beta)} d\beta \quad (\text{здесь } \beta \text{ – угол падения})$$

и напряжением сил адгезии образующегося при отвердевании капель льда, а также краевым углом смачивания. Здесь коэффициенты a_n и a_τ – коэффициенты восстановления нормальной и касательной компонент скорости соответственно. Достоверность полученных результатов обоснована сравнением с теоретическими и экспериментальными оценками других исследователей. Проведены параметрические исследования прилипания жидкости к рельефным покрытиям твердого тела, которые сформированы из комбинации гидрофобных и льдофобных материалов (рис. 1). Развита алгоритмы параллельных вычислений.

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

1. Aboud D.G.K., Kietzig A.M. On the oblique impact dynamics of drops on superhydrophobic surfaces. Part II: restitution coefficient and contact time: *Langmuir* 2018. V. 34. – P. 9889–9896.

2. 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.

3. Амелюшкин И.А., Стасенко А.Л. Моделирование взаимодействия кристаллов льда с поверхностью летательного аппарата: область орошения и коэффициенты восстановления скорости // *Инженерно-физический журнал*, 2020. Т. 93, № 2. – С. 597–605.

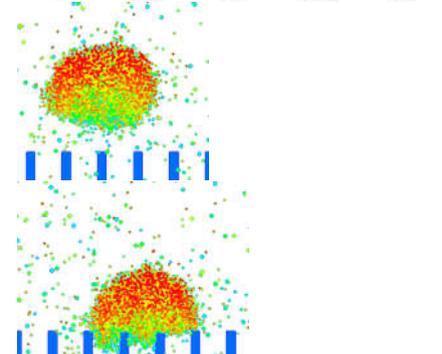
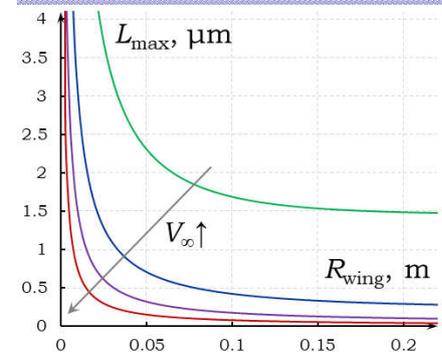
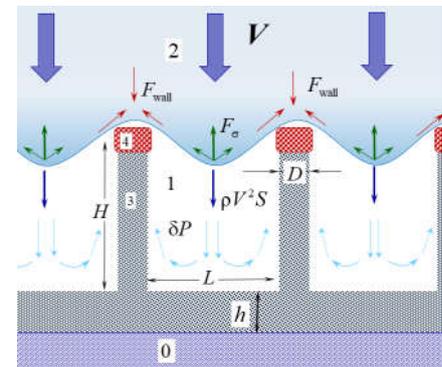


Рис. 1. Структура гидрофобного покрытия и схема взаимодействия с ним жидкости: 0 – материал конструкции обтекаемого тела, 1 – газ (воздух), 2 – жидкость, 3 – покрытие из гидрофобного материала, 4 – гидрофильные шляпки. Оценка зависимости максимального значения расстояния между выступами рельефа гидрофобного тела L_{max} от радиуса

ОПТИМИЗАЦИЯ РАССТАНОВКИ СКВАЖИН ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

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

При разработке нефтяных месторождений часто необходимо определять параметры подземных пластов по измеряемым параметрам в скважинах и оптимизировать саму разработку месторождений. Для этого необходимо решать, в частности, обратные задачи, позволяющие найти неизвестные параметры гидродинамических моделей пластов при помощи их калибровки (адаптации) к наблюдаемым данным. Рассмотрим эту проблему на примере двух задач: 1) определение проницаемости пласта по забойному давлению и измерению расхода нефти через скважины и 2) определение оптимальной расстановки скважин, позволяющей максимизировать добычу нефти в течение заданного интервала времени.

Эффективность предлагаемого метода оценивается на примере трехмерной синтетической модели нефтяного месторождения – пласта, состоящего из 3-х более тонких пропластков, которые могут быть насыщены водой и нефтью. На этом месторождении установлены 6 добывающих скважин. Данная гидродинамическая модель пласта (модель 0) построена в момент времени $t=0$ лет, в течение 10 лет велась разработка месторождения (рис.). В момент времени $t=10$ лет (настоящее время) замечено, что данные наблюдений не совпадают с данными модели 0. С помощью метода оптимизации была проведена корректировка модели (модель 1) – уточнения значений проницаемостей пластов. Для увеличения добычи нефти в течение последующих 10 лет, используя скорректированную модель 1, расставляются 3 нагнетающие скважины оптимальным образом так, чтобы добыча была максимальной. Таким образом, была увеличена добыча нефти на 7% по сравнению с тем, если бы разработка велась бы все 20 лет без нагнетающих скважин.

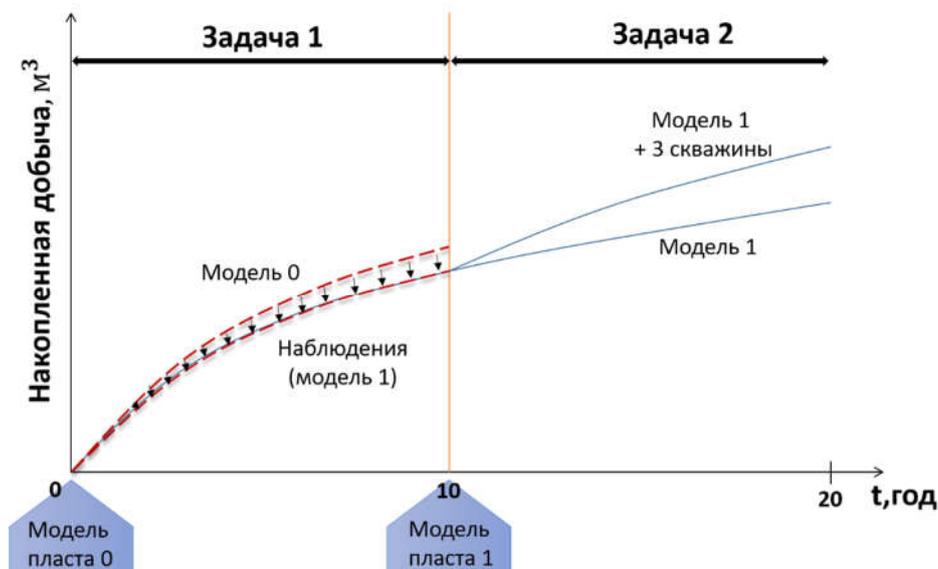


Рис. Иллюстрация постановки задач 1) – корректировки модели 0 к наблюдениям и 2) - оптимальная расстановка нагнетающих скважин для увеличения добычи нефти.

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

1. Onwunalu J.E., Durlifsky L.J. Application of a particle swarm optimization algorithm for determining optimum well location and type // Comput. Geosci. 2010. V. 14. N 1. P. 183-198.

2. Zhang K., Li G., Reynolds A.C., Yao J., Zhang L. Optimal well placement using an adjoint gradient // J. Pet. Sci. Eng. 2010. V. 73. N 3-4. P. 220–226.

3. Naderi M., Khamehchi E. Well placement optimization using metaheuristic bat algorithm // J. Pet. Sci. Eng. 2017. V. 150. P. 348-354.

ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

А.А.Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Исследуется свободная конвекция в трещиновато-пористой среде, т.е. среде, содержащей высокопроницаемые трещины (или каналы), вмещенные в низкопроницаемую матрицу – однородную среду с микро-пористостью. Фильтрация в подобных средах осложняется нарушением локального теплового равновесия между трещинами и матрицей. Влияние неравновесного характера течения на конвекцию исследуется в классической постановке Рэлея—Бенара [1], описывающей развитие ячеистой конвекции в подогреваемом снизу горизонтальном слое насыщенной трещиновато-пористой среды (Рис.).

Для описания течений используется модель двойной пористости и проницаемости, построенная с использованием двух взаимопроникающих континуумов. Один континуум соответствует трещинам, а второй – блокам. В каждой из этих сред тепломассобмен описывается системой законов сохранения и законом Дарси. Учитывается как кондуктивный, так и конвективный теплообмен между средами. Показано, что в такой двойной среде критическое число Рэлея зависит только от трёх параметров подобия, характеризующих распределение коэффициентов проницаемости и теплопроводности между трещинами и матрицей, а также параметра, описывающего интенсивность тепломассообмена между континуумами.

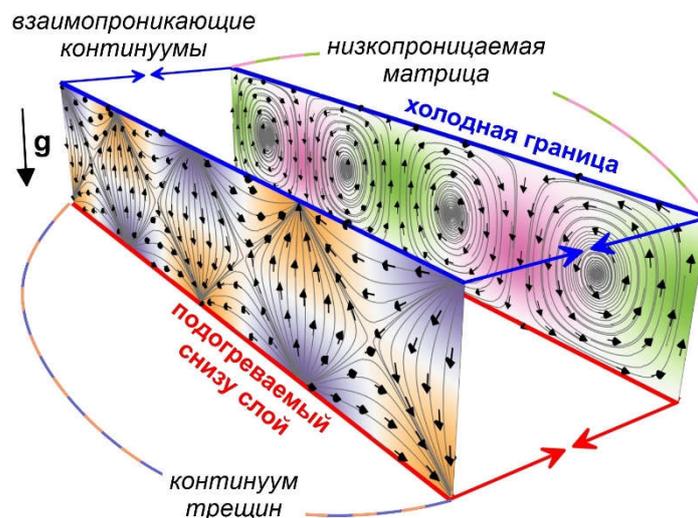


Рис. Схема постановки двумерной задачи. Показаны линии тока в трещинах и низкопроницаемой матрице.

В линейном приближении исследованы решения дисперсионного уравнения, описывающего условия развития конвекции. Обнаружена богатая картина режимов конвективных течений. В зависимости от параметров среды и граничных условий существуют режимы как с совпадающим, так и противоположным направлением течения в трещинах и матрице (Рис.). Течение может перестроиться в режим «плоской» конвекции, в котором нагретая жидкость поднимается только по трещинам, а холодная жидкость опускается по матрице. Показано, что в определенном диапазоне параметров именно тепломассобмен между континуумами, а не внутри них, приводит к потере устойчивости стратификации жидкости и развитию конвекции. Подробно описана диаграмма решений при малой степени надкритичности. Важный для практических приложений вывод заключается в том, что неоднородность пористой среды, например, связанная с трещиноватостью, всегда понижает запас устойчивости тепловой стратификации жидкости. Проведено численное моделирование фильтрации, подтвердившее результаты аналитического исследования дисперсионного уравнения.

Работа выполнена в рамках проекта МД-3567.2018.1 Совета по грантам Президента РФ.

1. Nield, D. A. & Bejan, A. Convection in porous media, 5th edn. New York, 2017. NY: Springer.

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ MUFITS

А.А.Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Комплекс программ гидродинамического моделирования MUFITS – некоммерческий академический симулятор для расчёта фильтрационных течений в различных геотехнологических приложениях и природных процессах [1,2]. Функциональность симулятора включает в себя различные модули уравнений состояния пластовых жидкостей и газов, позволяющих применять его для прогнозирования показателей разработки углеводородных месторождений, исследования процессов при подземном хранении газов и оценки перспективности извлечения из недр геотермальных ресурсов. Недавно функциональность симулятора была дополнена композиционным модулем, позволяющим учесть многокомпонентный состав жидкостей, насыщающих проницаемые горные породы [3]. В рамках модуля парожидкостные равновесия многокомпонентных смесей рассчитываются итерационным методом по кубическому уравнению состояния.

Композиционный модуль, в частности, может использоваться для моделирования газового воздействия на нефтяные пласты, когда извлечение нефти достигается за счёт закачки газа, а не воды (Рис.). Пластовая нефть может состоять из различных компонент углеводородного ряда: метана (CH_4), этана (C_2H_6), других алканов ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) и других компонент. Вытесняющий газ может содержать метан, азот (N_2), углекислый газ (CO_2), сероводород (H_2S) и другие газы. Закачка газа приводит к развитию смешивающегося вытеснения нефти от нагнетательных к добывающим скважинам. При этом развивается протяжённая область смешения, в которой происходит двухфазная фильтрация нефти и газа, а параметры течения, в том числе насыщенности фаз нефти и газа и их компонентный состав, изменяются в последовательности сильных разрывов и волн Римана [3]. Эффективность вытеснения зависит от компонентных составов нефти и газа. В работе исследуется вопрос: какой состав вытесняющего газа позволяет извлечь максимальное количество нефти?

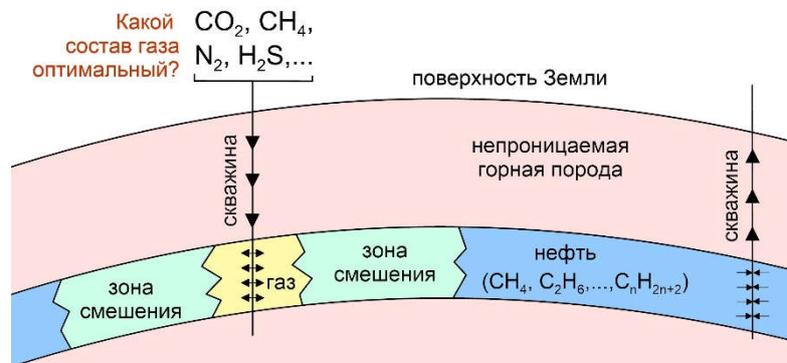


Рис. Схема исследуемого процесса: многокомпонентный газ закачивается в проницаемый пласт с целью вытеснения нефти.

В данной работе предлагается метод расчёта оптимального состава в комплексе программ MUFITS. Метод основывается на проведении серии расчётов одномерных задач вытеснения с целью поиска экстремума целевой функции. Целевая функция отражает количество наиболее ценных компонент нефти, извлеченных в течение заданного интервала времени. Данный подход реализован в MUFITS с помощью вспомогательной программы, позволяющей автоматизировано изменять входные параметры расчётов фильтрации (т.е. состав закачиваемого газа), запускать расчёты фильтрации и рассчитывать соответствующее значение целевой функции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-31-80009).

1. MUFITS reservoir simulation software. www.mufits.imec.msu.ru
2. Afanasyev A.A. Hydrodynamic modelling of petroleum reservoirs using simulator MUFITS// Energy Procedia. 2015. 76: 427-435
3. Афанасьев А.А., Веденева Е.А. Исследование эффективности закачки газа и воды в нефтяной пласт// Изв. РАН. МЖГ. 2020. №5. С. 46-55.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО ДВИЖУЩЕГОСЯ РАСТЯГИВАЕМОГО ВЯЗКОГО МАТЕРИАЛА

В.С. Афанасьев, Н.В. Баничук, С.Ю. Иванова

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

e-mail: ciber200hlm500x@yandex.ru, banichuk@gmail.com, syuivanova@yandex.ru

Исследования устойчивости и динамики продольного движения материалов, моделируемых в виде движущихся гибких струн, балок, панелей и пластин, представляют большой теоретический и практический интерес. В монографии [1] дан широкий обзор научной литературы по указанной проблематике. Отметим также работы [2 – 4], в которых исследуются, соответственно, проблема гашения возникающих поперечных колебаний продольно движущейся панели, статическая бифуркация нагретой панели, движущейся в оттоке идеальной жидкости и анализ ускоренного продольного движения мембранной панели, описываемого гипергеометрическим уравнением.

В работе рассматривается при отсутствии массовых сил одномерное продольное движение растягиваемой струи (волокна) вязкого материала (Рис. 1).

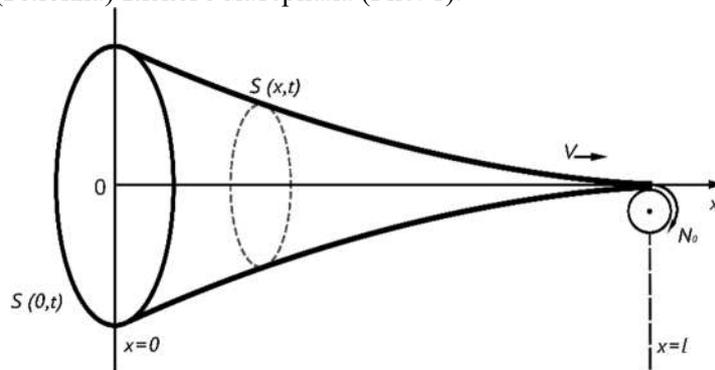


Рис. 1 Продольное движение вязкого материала.

С применением законов сохранения массы и количества движения показано, что стационарное течение характеризуется экспоненциальным уменьшением толщины струи и согласованным экспоненциальным возрастанием ее скорости. Проблема устойчивости поведения движущегося вязкого материала изучается с учётом осевых напряжений, а также с использованием декомпозиции искомых определяющих переменных модели в виде суммы стационарных распределений и малых возмущений. Выводятся уравнения для возмущений переменных состояния, зависящие от определяющего параметра (обратного числу Рейнольдса), характеризующего комбинированное влияние вязкости, плотности, начальной скорости и длины рассматриваемого интервала. Рассмотрение полученной линеаризованной модели и выведенных спектральных соотношений привело к выводу об отсутствии нетривиальных возмущений при малых значениях определяющего параметра и, тем самым, об устойчивости изучаемой системы.

Работа выполнена по теме Госзадания (номер госрегистрации АААА-А20-120011690132-4) и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №20-08-00082а).

1. Banichuk N.V., Barsuk A.A., Jeronen J., Tuovinen T., Neittaanmaki P. Stability of Axially Moving Materials, Solid Mechanics and Its Applications Vol. 259. Springer Nature Switzerland AG, Cham. 2020. 642 P.

2. Баничук Н. В., Иванова С. Ю. Оптимальное подавление возмущений движущихся термоупругих панелей // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 1. С. 29–33.

3. Баничук Н.В., Афанасьев В.С., Иванова С.Ю. О статической бифуркации движущейся нагретой панели, обтекаемой идеальной жидкостью // Прикладная Математика и Механика. 2020. Т. 84. № 2. С. 244–241.

4. Banichuk N.V., Ivanova S.Y., Afanas'ev V.S. On axial constant acceleration movement and small transverse vibrations of membrane panel // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. Vol. 40. No. 3. P.274–277.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕДРЕННОЙ КОСТИ НА ОСНОВАНИИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

С.М. Босяков¹, М.А. Афанасьева¹, С.А. Голякевич², И.Э. Шпилевский³

¹ Белорусский государственный университет, Минск

² Белорусский государственный технологический университет, Минск

³ Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии, Минск

e-mail: marinal5111@gmail.com

Основным методом лечения доброкачественных опухолей и метастатических поражений трубчатых костей конечностей является хирургическое удаление пораженного участка в пределах неизменных тканей (секторальная или хирургическая резекция) с образованием костного (секторального) дефекта. В результате хирургической резекции кости прочность костного сегмента, а также функциональные возможности конечности снижаются, поскольку повышается риск патологического перелома в области резекции. В настоящей работе представлены результаты определения главных деформаций в области пострезекционного дефекта на основании тензометрических испытаний для прогнозирования изменения прочности бедренной кости на основании коэффициента увеличения главных деформаций [1].

В качестве образца использована интактная сухая бедренная кость взрослого человека. Бедренная кость жестко закреплялась в металлическом цилиндрическом сосуде с помощью эпоксидной смолы. Нагружение кости соответствовало действию собственного веса человека. Тензометрические измерения главных деформаций выполнены в ходе нагружения бедренной кости на испытательной машине УМ-5А (максимальная нагрузка 400 Н, скорость нагружения 2 мм/мин, точность измерения $\pm 1\%$). Расположение тензодатчиков на интактной бедренной кости показано на рисунке 1.

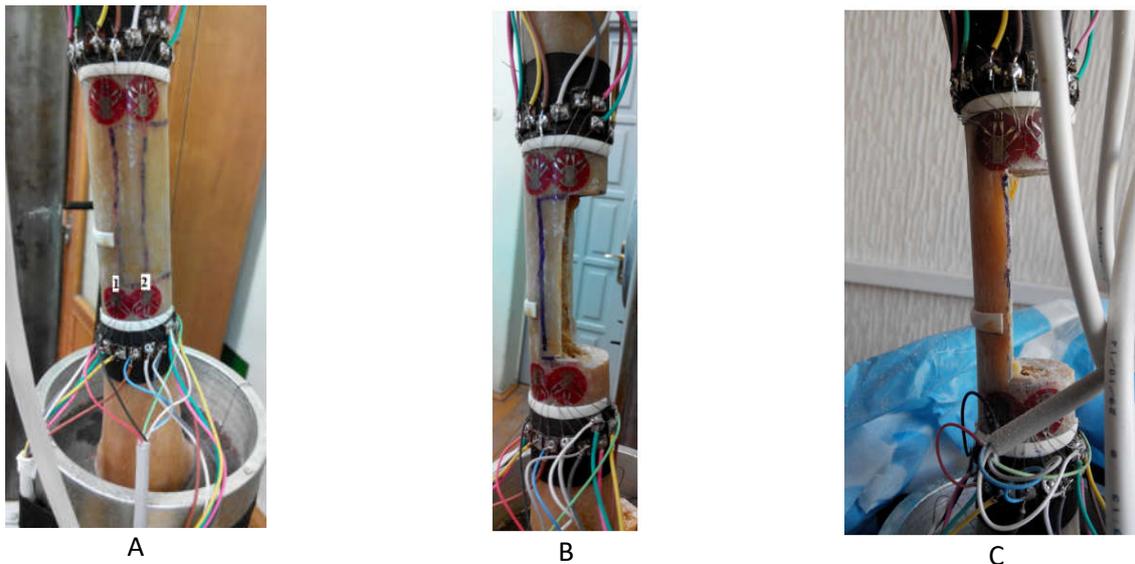


Рис. 1. Расположение тензометрических датчиков на бедренной кости:

А – интактная бедренная кость (1, 2 – датчики для определения главных деформаций); В – бедренная кость с пострезекционным дефектом (угловой размер 180° , линейный размер 54 мм); С – бедренная кость с пострезекционным дефектом (угловой размер 270° , линейный размер 54 мм).

В ходе эксперимента получены зависимости главных деформаций, возникающих в интактной (неповрежденной) бедренной кости и бедренной кости с пострезекционными дефектами, имеющими различные угловые размеры.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция» (задание 1.8.01.1).

1. Sternheim A., Giladi O., Gortzak Ya., Drexler M., Salai M., Trabelsi N., Milgrom Ch., Yosibash Z. Pathological fracture risk assessment in patients with femoral metastases using CT-based finite element methods. A retrospective clinical study // Bone. 2018. Vol. 110. P. 215–220.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА В ВОЗДУХЕ

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

¹ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

e-mail: nata.bel.94@mail.ru

Горение частиц титана в воздухе в последнее время привлекает пристальное внимание исследователей [1], рассматриваются возможные перспективы применения титана в качестве энергетического компонента в ракетном топливе и во взрывчатых смесях промышленного назначения, а также в качестве модификатора горения смесевых композиций. Данная работа продолжает наши исследования [2] – [5] горения крупных (до 500 микрометров) частиц титана в свободном падении в воздухе. Частицы в [2] и [3] были монодисперсными агломератами, сформированными из большого количества мелких частиц неправильной формы. В [4] – [5] мы использовали модифицированный подход, который даёт возможность получать изначально монолитные горящие частицы титана с диаметром до 700 микрон. Особенность этого подхода - возможность “тонкой настройки” начального размера частиц, что позволило изучить закономерности процесса фрагментации в зависимости от размера частиц. В частности, был определён граничный диаметр частиц, разделяющий качественно различные режимы фрагментации, имеющие вид звездообразного взрыва или еловой ветки.

В данной работе впервые исследованы пористые частицы титана с размерами порядка сотен микрометров. Пористые осференные частицы были получены методом механоактивации в шаровой мельнице АГО-2 и их можно рассматривать как новый вид титанового металлического горючего.

В работе представлены данные морфологического и гранулометрического анализов исходных частиц методами оптической и электронной микроскопии и результаты определения эффективной плотности частиц. Эта плотность является ключевым параметром, который позволяет вычислять начальный диаметр горящих частиц после их компактизации в результате плавления, по геометрическому размеру исходных «холодных» пористых частиц. Эксперименты по горению пористых частиц проведены в той же постановке, как в [2] и [3]. Сообщены результаты определения времён горения частиц в зависимости от диаметра, а также данные о фрагментации частиц и о конденсированных продуктах горения (рис.1).

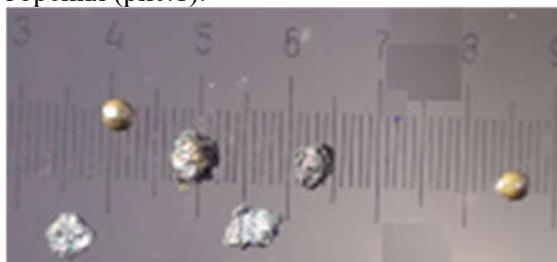


Рис. 1. Вид остатков горения пористых частиц Ti под оптическим микроскопом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-03-00294.

1. Glotov O.G. Ignition and combustion of titanium particles. Experimental methods and results // *Physics-Uspekhi*, Vol. 62, No. 2, 2019. pp. 131-165. <https://ufn.ru/en/articles/2019/2/b/>.

2. Glotov O.G. Combustion of spherical titanium agglomerates in air. I. Experimental approach // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 49, No. 3, 2013. pp. 299–306.

3. Glotov O.G. Combustion of spherical titanium agglomerates in air. II. Experimental results // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 49, No. 3, 2013. pp. 307–319.

4. Belousova N.S., Glotov O.G., Surodin G.S. Fragmentation and formation of condensed products upon combustion of titanium particles in air // *Energetic Materials – Past, Present and Future. 50th International Annual Conference of the Fraunhofer ICT. Karlsruhe, Germany, June 25 – 28. 2019.* pp. 13-1–13-14.

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

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 смешением 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.

ОБРАТИМАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И НАГРЕВАНИИ ПОД НАГРУЗКОЙ 5-ТИ СЛОЙНОГО ОБРАЗЦА СПЛАВА TiNi, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ

Р.М. Бикбаев^{1*}, I.A.Palani², Н.Н. Реснина¹, С.П. Беляев¹, S. S. Mani Prabu², М. Manikandan²,
S. Jayachandran², Anshu Sahu²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
² Discipline of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Indore, Indore, INDIA
e-mail: BikbaevRM@yandex.ru

Одним из перспективных направлений в материаловедении является использование аддитивного производства для получения изделий из сплава TiNi с памятью формы. При использовании такой технологии структура материала является слоистой и, как ранее было установлено, при таком способе производства химический состав слоев и их структура существенно различаются. Это влияет как на мартенситные превращения, так и на функциональные свойства сплавов с памятью формы. Поэтому важно исследовать взаимосвязь структуры и функциональных свойств таких объектов. Целью настоящей работы явилось изучение обратимой деформации пятислойного образца сплава TiNi, полученного методом послойной наплавки, при его охлаждении и нагревании под напряжением в интервале температур фазовых переходов.

Пятислойные образцы из сплава TiNi синтезировали на титановую подложку методом электродуговой послойной наплавки, в котором в качестве расходного электрода выступала проволока сплава Ti_{49,1}Ni_{50,9} диаметром 1,2 мм. На электроэрозионном станке «АРТА 153 ПРО» из полученного образца вырезали пластины, толщиной 0,5 мм, из которых изготавливали образцы, ширина и длина рабочей части которых составляла 1 и 10 мм, соответственно. Образцы подвергали термообработке при температуре 450 °С в течении 10 часов. Образцы нагружали при температуре 140 °С, при которой все слои находились в аустенитной фазе, и охлаждали и нагревали через интервал мартенситных переходов под постоянным ε , % напряжением, величину которого варьировали от 50 до 400 МПа.

Полученные результаты показали, что изменение деформации при охлаждении и нагревании под постоянным растягивающим напряжением происходит в несколько хорошо различимых стадий. Это связано с тем, что существует неоднородное распределение никеля по слоям и различные слои претерпевают мартенситные переходы при различных температурах. Увеличение напряжения, действующего при охлаждении и нагревании, приводит как к увеличению обратимых, так и необратимых деформаций, а также к возрастанию температур мартенситных переходов. Влияние напряжения на изменение обратимой деформации и температуры превращений различно для второго и третьего с четвертым слоями. Это связано с тем, что во втором слое концентрация никеля не превышает 50,0 ат. %, поэтому его свойства близки к свойствам эквиатомного никелида титана, который характеризуется низким пределом дислокационного скольжения. Поэтому во втором слое активно накапливается необратимая деформация при охлаждении и нагревании. В третьем и четвертом слоях концентрация никеля превышает 50,0 ат. %, поэтому пластическая деформация в них затруднена.

Работа выполнена в рамках совместного проекта РФФИ (№ 19-49-02014)-DST (№ DST/INT/RUS/RSF/P-36).

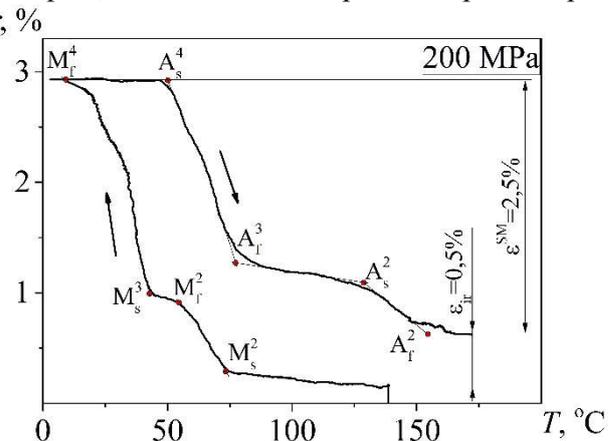


Рис. 1. Изменение деформации в процессе охлаждения и нагревания при постоянном напряжении

О СВЯЗИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МОДЫ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ С ПУЛЬСАЦИЯМИ ПРОДОЛЬНОЙ СКОРОСТИ НА ОСИ ДОЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

Г.А. Фараносов¹, О.П. Бычков¹

¹ Научно-исследовательский московский комплекс ЦАГИ, 105005, Москва

e-mail: oleg.bychkov@tsagi.ru

Турбулентная струя остается одним из самых исследуемых объектов со времен создания первых реактивных двигателей. Существует ряд возможных объяснений генерации шума в турбулентной струе, среди которых можно выделить механизм, связанный с развитием за счет неустойчивости Кельвина-Гельмгольца когерентных крупномасштабных структур в слое смешения струи. Эффективность излучения шума пакетами волн неустойчивости проявляется в основном для случаев сверхзвуковых струй, однако и в случае дозвуковых скоростей истечения данный механизм рассматривается с некоторыми модификациями в виде, например, учета случайности в процессе генерации пакетов. Так в работе [1] волны неустойчивости рассматривались как наиболее подходящими объектами активного управления, в том числе с целью снижения уровней пульсаций давления в ближнем поле струи.

Кроме того, в том числе в работе [2] было продемонстрировано, что именно рассеяние ближнего гидродинамического поля струи (следа пакетов волн неустойчивости) на задней кромке крыла приводит к появлению дополнительного эффективного источника шума взаимодействия дозвуковой струи и крыла самолета. Таким образом, изучение пространственной структуры волновых пакетов в струе и в ближнем поле представляет собой значительный интерес.

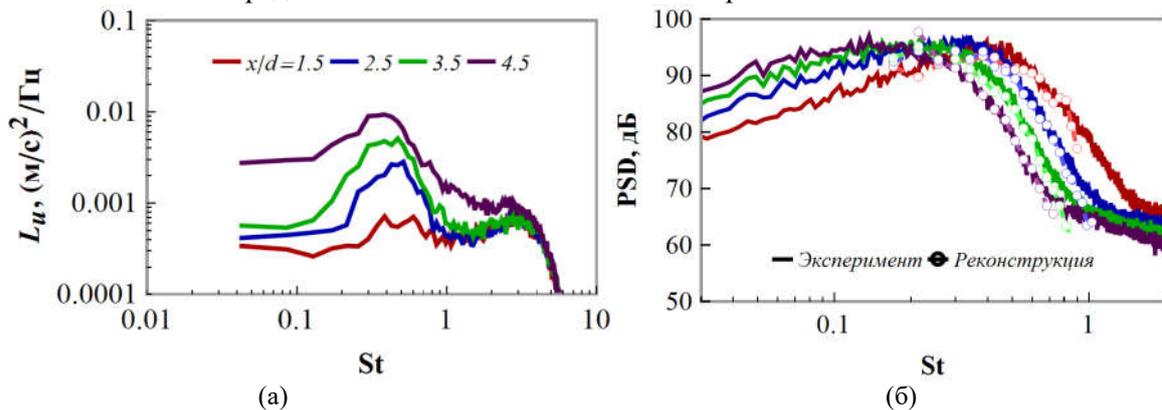


Рис. Спектры пульсаций (а) продольной скорости для различных положений на оси струи, (б) – давления, полученных пересчетом из пульсаций скорости (символы) и измеренных в эксперименте (сплошные линии) для разных точек на конической поверхности, окружающей струю.

В связи с вышесказанным в настоящей работе проводится подробное исследование радиальной структуры пакетов волн неустойчивости с использованием набора термоанемометрических измерений средних и пульсационных характеристик поля продольной скорости, а также измерений пульсаций давления в ближнем поле при помощи азимутальной решетки микрофонов. Данные исследования позволили построить упрощенную процедуру восстановления характеристик пульсаций давления осесимметричной моды ближнего поля по известным данным о пульсациях скорости на оси струи, что оказывается полезным в случае наличия спутного потока, когда замывание микрофонов средним потоком не позволяет производить прямых измерений без существенной модификации измерительной системы [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 19-71-10064).

1. Беляев И.В., Бычков О.П., Зайцев М.Ю., Копьев В.А., Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Фараносов Г.А., Чернышев С.А. Разработка стратегии активного управления волнами неустойчивости в невозбужденных турбулентных струях. // Известия РАН МЖГ. 2018. №3. стр. 14-27.

2. Бычков О.П., Фараносов Г.А. Экспериментальное исследование и теоретическое моделирование шума взаимодействия струи и крыла самолета. // Акустический журнал. 2018. Т. 64. №4. стр. 437-453.

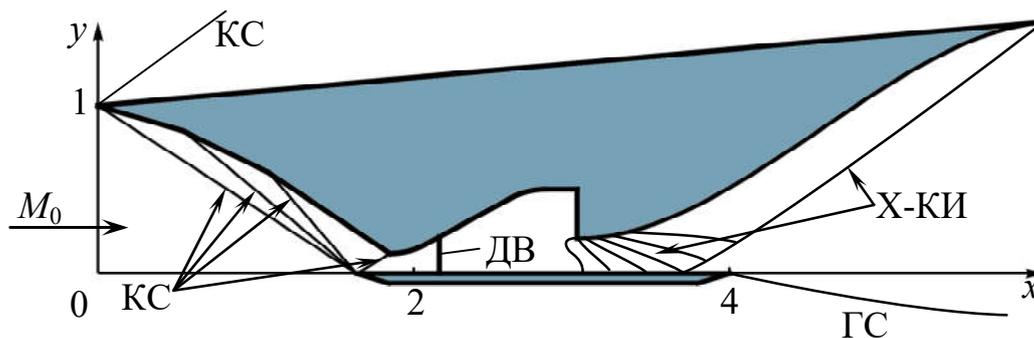
3. Bychkov O., Faranosov G., Kopiev V., Soares L.F.M., Cavalieri A.V.G. The Modelling of Jet-Plate Interaction Noise in the Presence of Co-Flow. // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2019-2492, May 2019.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА С ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ НА ВОЛНУ ЧЕПМЕНА- ЖУГЕ И ОБРАТНО

Х.Ф. Валиев, А.Д. Егорян
ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва
e-mail: haris@ciam.ru

Изучается динамика течений идеального (невязкого и нетеплопроводного) газа с горением в структурно устойчивой детонационной волне (ДВ) – нормальной оси канала поверхности разрыва. Как установлено ранее [1], в такой постановке одномерные стационарные течения с горением в ДВ Чепмена - Жуге всегда неустойчивы, чего нельзя сказать о течениях с горением в пересжатой ДВ. Изучение динамики таких течений сведено к численному решению начально-краевой задачи, описывающей развитие конечных возмущений потока между движущейся ДВ и минимальным (при внезапном сужении) или выходным сечениями сопла [2]. Для ее решения модифицированной схемой Годунова повышенного порядка аппроксимации создан алгоритм расчета распада разрыва, допускающий переключения (с пересжатой ДВ на ДВ Чепмена - Жуге и обратно) явно выделяемых ДВ. Приведены примеры устойчивых и разрушающихся большими начальными возмущениями течений, с расчетом их динамики с вышеупомянутыми переключениями.

На рисунке показана типичная схема двумерного течения в канале в плоскости xu . Число Маха на входе M_0 , газ тормозится в косых скачках КС. В расширении входной части находится ДВ. Показаны характеристики X-КИ течения газа в сопле и граница струи ГС.



Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-01-00100 и 18-31-20059).

1. Крайко А.Н. Неустойчивость стационарных течений в каналах переменной площади поперечного сечения с детонационной волной Чепмена-Жуге // Прикл. матем. и механ. 2019. Т. 83. Вып. 3. С. 354-369.

1. Валиев Х.Ф., Крайко А.Н., Тилляева Н.И. Устойчивость одномерных стационарных течений с детонационной волной в канале переменной площади // Ж. выч. матем. и матем. физики 2020. Т. 60. № 4. С. 711-724.

О РОЛИ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ В РАСЧЕТЕ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРД

А.Д. Егорян, Х.Ф. Валиев
ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва
e-mail: arche_hl@mail.ru

В работе, как и в [1,2], выполнен термодинамический и газодинамический анализ разных типов ВРД с дефлаграционным и детонационным горением. Идеальные характеристики ВРД зависят от двух безразмерных параметров: числа Маха полета M_0 и q – безразмерной удельной теплотворной способности горючей смеси. Рассмотрим нестационарный режим работы PDE, ввиду того, что идеальные характеристики его не учитывают.

PDE рассматривается как набор цилиндрических детонационных камер с мгновенно открывающимися и закрывающимися входными клапанами. При открытых входах в камеры поступает идеально перемешанная горючая смесь. Детонационная волна мгновенно без дополнительных энергозатрат инициируется у одного из концов камеры. Правый конец камеры – сечение внезапно сужающейся части сопла с заданным отношением f площади его критического сечения к площади поперечного сечения камеры. Внезапное сужение удобно по конструктивным соображениям. На стационарном режиме такие сопла лучше сопел с плавным входом [3].

При заданных f , M_0 и q в течении периода работы детонационной камеры PDE отношение скоростей V_e/V_0 получается как функция времени. Его интегрирование по периоду дает средние значения V_e/V_0 и тяговые характеристики с учетом нестационарности и неизэнтропичности течения продуктов сгорания в детонационной камере.

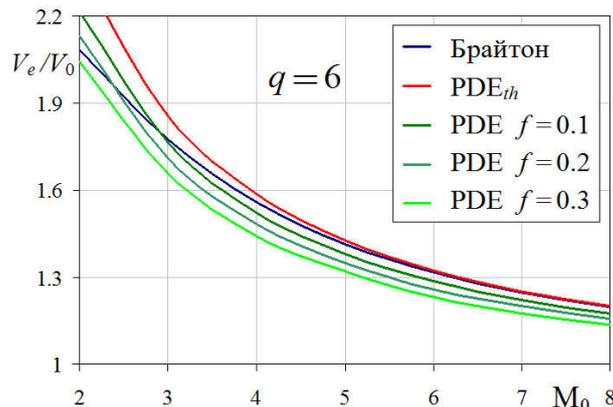


Рис. V_e/V_0 ВРД (цикл Брайтона) и PDE, рассчитанные по идеальному кпд (PDE_{th}) и по нестационарной модели.

Утверждения о возможном увеличении тяговых характеристик ВРД благодаря использованию детонационного горения необоснованны. Даже для малых чисел Маха полета, на которых ВРД с горением при постоянном давлении может по тяговым характеристикам уступать PDE, последние заведомо уступают ТРД с медленным горением. Поэтому преимущества ВРД с детонационным горением, если и возможно, то не по тяговым характеристикам, а по простоте конструкции или по меньшей теплонапряженности тракта двигателя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-01-00100 и 18-31-20059).

1. Зельдович, Я.Б.: К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения. Журнал технической физики. Т. 10. Вып. 17. С. 1453-1461 (1940)

2. Heiser, W.H., Pratt, D.T.: Thermodynamic Cycle Analysis of Pulse Detonation Engines. J. of Propulsion and Power. V. 18. No. 1. P. 68-76 (2002)

3. Kraiko A.N., Myshenkov E.V., P'yankov K.S., Tillyayeva N.I. Effect of gas non-ideality on the performance of Laval nozzles with an abrupt constriction // Fluid Dynamics. 2002. V. 37. No. 5. P. 834-846.

К ЧИСЛЕННОМУ ИНТЕГРИРОВАНИЮ УРАВНЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗВУКОВОМУ УДАРУ

Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко, Е.А. Яковлев
ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва
e-mail: haris@ciam.ru

Огромное многообразие работ по математическому моделированию звукового удара, возникающего при полёте сверхзвуковых гражданских самолетов, предполагает разбиение всего течения на две подобласти: близкую к летательному аппарату (ЛА) и далекую от него. В близкой подобласти возмущения течения велики, а скачки уплотнения (ударные волны – УВ) интенсивны и имеют сложную пространственную структуру. В системе координат ЛА течение в этой подобласти в основном стационарное и сверхзвуковое с небольшими дозвуковыми зонами, в частности, вблизи затупленных кромок крыльев. Влияние нестационарности вихрей, сходящих с концов крыльев и хвостового оперения, реактивных струй и турбулентности в пограничных слоях на эволюцию ударно-волновых структур, ответственных за звуковой удар, невелико и убывает с удалением от ЛА. Поэтому для моделирования звукового удара расчет течения в ближней подобласти возможен в рамках уравнений Эйлера. По сравнению с современными расчетами обтекания всего ЛА в приближении осредненных по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (RANS) такой расчет много проще, ибо не требует сгущения сетки у поверхностей, обтекаемых без прилипания, и пограничных слоев. Существенно то, что установлением по времени нужно рассчитывать область, ограниченную длиной ЛА, а далее вести счет маршем по оси x , направленной по скорости набегающего на ЛА сверхзвукового потока. Чтобы правильно рассчитать эволюцию ударно-волновой структуры, при маршевом счете следует при каждом x ограничиваться только возмущенной областью, по возможности адаптируя сетку к зоне УВ. При удалении по x от ЛА на 5-10 его длин, когда максимальное относительное возмущение давления $|\Delta p/p_0|$ уменьшится до 0.1, следует переходить к маршевому счету [1] в приближении нелинейной акустики. Явное выделение в этом приближении "внешней" и "внутренней" близких к коническим, "бегущих в одном направлении" слабых УВ при на порядки меньшем, чем вблизи ЛА общем фиксированном числе ячеек позволит рассчитать звуковой удар на расстояния в многие сотни длин ЛА. Ключевой элемент такого расчета – одно семейство сеточных линий, "бегущих в том же направлении" и как следствие – адаптированных к волновой "квазиколецевой" (в дальней подобласти) структуре звукового удара.

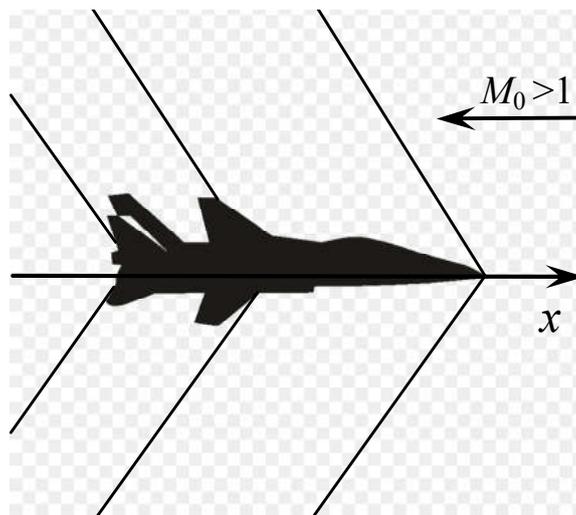


Рис. Схема течения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-01-00100 и 18-31-20059).

1. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

EFFECT OF NATURAL-RUBBER ADDITION AGENTS ON LOW DENSITY POLYETHYLENE DETERIORATION IN ECOLOGICAL ENVIRONMENT (ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА НА БИОРАЗЛАГАЕМОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ)

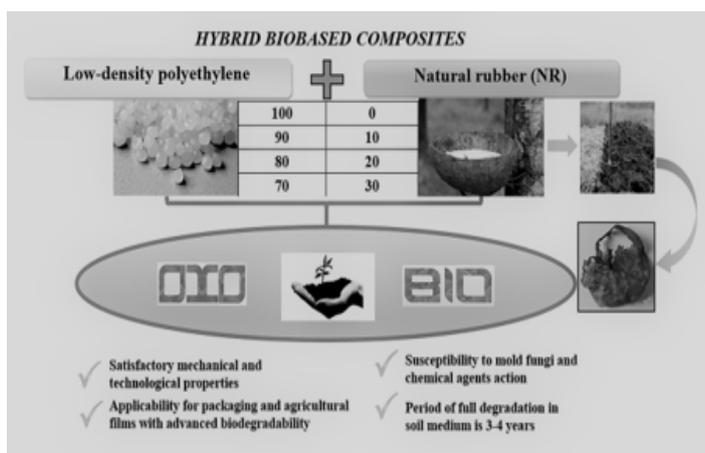
I.A. Varian^{1,2}, N.N. Kolesnikova¹, E.E. Mastalygina^{1,2}, A.A. Popov^{1,2}

¹Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow

²Plekhanov Russian University of Economics, Moscow

e-mail: ivetta.varyan@yandex.ru

Development of biodegradable polymeric materials, resulting from addition of the natural filler of renewable raw materials to the synthetic cavity is one of the prospective approaches to solving the environmental problem of plastic packing and agricultural film's waste treatment.



The composite materials' properties based on popular low density polyethylene (LDPE) film material production laced with raw natural rubber, which is quite quickly exposed to oxidative and biological degradation, are examined in the present work. The polymers were compounded in blending machine of Brabender type at temperature of 140°C, then they were pressed at 140°C with further quick chilling to temperature of 20±20°C. The thickness of film samples was 140±10 μm. The results of NR effect on composites' properties determination are provided in the Table below.

Sample of PE/NR	ε _b , %	σ, MPa	E _{mod} , MPa	ΔM ₀ , %	ΔM ₁ , %	ΔM ₂ , %
100	613	15.1	87	0	0	0.3
90/10	120	6.3	62	2	0.5	0.4
80/20	260	6.5	54	3	1.2	0.7
70/30	330	6.4	46	6	1.3	2.7
60/40	330	4.8	38	10	3.2	30.5
50/50	330	3.9	29	12	7.3	42.0

Note: ε_p – elongation at break (at 100 mm/min.) % (± 10 %), σ – tensile stress at break, MPa (± 0.5 MPa), E_{mod} – elasticity modulus, MPa (± 5 MPa), ΔM₀ – equilibrium water absorption %, ΔM₁ – field weight loss in soil for 15 months., weight %, ΔM₂ – laboratory weight loss in soil for 17 months., weight %.

Despite of mechanic indexes decrease, the PE/NR compositions comply with requirements, provided for household and agricultural products. The samples highest weight loss, as well as deterioration degree after their holding in soil is observed for mixtures with NR 40 and 50 weight %. These same mixtures are defined by the largest indexes of water absorption, which contributes to microorganisms' growth and development. The results have testified that polyethylene with natural rubber composites have higher biodegradability factor in ambient conditions as compared to alone polyethylene.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОГРАНИЧНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ СЛОЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УСЛОВИЙ ВЕТРО- ВОЛНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В УСЛОВИЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, А.А. Кандауров, Ю.И. Троицкая
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
e-mail: arfrius@yandex.ru

Модели циркуляции атмосферы и океана представляют собой один из основных инструментов климатических исследований, прогнозирования погоды и т.д. При численном моделировании климата и погоды, турбулентные потоки импульса и тепла между атмосферой и океаном количественно выражаются через «балк»-формулы, которые связывают их со средними метеорологическими величинами, измеренными на стандартной высоте 10 м, используя определения коэффициентов обмена импульса (коэффициент сопротивления) и теплом. К настоящему времени достоверно установлен факт тенденции насыщения аэродинамического сопротивления при скоростях U_{10} выше 25-27 м/с [1]. Это связывают в первую очередь с влиянием обрушений волн, образованием пены и началом генерации брызг. Экспериментальные данные о зависимости коэффициента теплообмена от скорости ветра характеризуются более значительным разбросом, чем для импульса [1], при этом нет точных данных о влиянии волнения на теплообмен. На Ветро-Волновом Термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН были проведены исследования обменных процессов в пограничном турбулентном слое для широкого диапазона скоростей ветра (U_{10} от 10 до 36 м/с) и параметров волнения. Для возможности изменения параметров волнения при фиксированном ветре, использовалась заглубленная мелкоячеистая пластиковая сетка, натянутая вдоль канала. При этом сетка не влияла на теплообмен. Для создания перепада температур между водой и ветровым потоком поступающий в канал воздух нагревался до 30-40 градусов. Температура поверхности воды в ходе всех экспериментов поддерживалась постоянной (около 15 градусов).

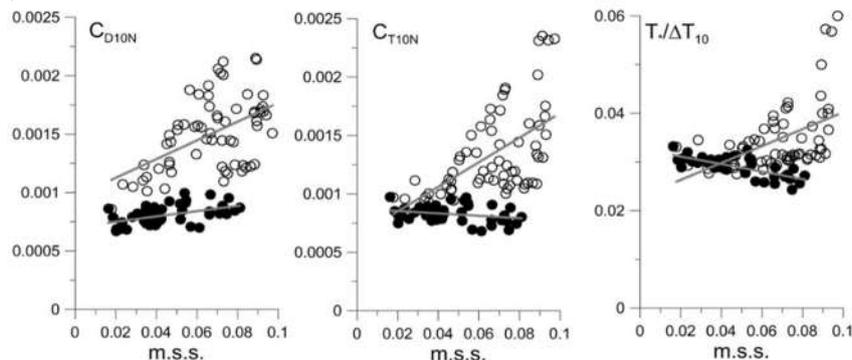


Рис.1 Зависимость от среднеквадратичного уклона волн (крутизны) (а) коэффициента обмена импульсом (б) обмена теплом (в) температурной шероховатости. Черные кружки – отсутствие брызг, белые – наличие брызг. Прямые – линейные аппроксимации.

Показано, что обмен импульсом растет при увеличении скорости ветра и крутизны волнения. Температурная шероховатость практически не зависит от крутизны волнения и резко возрастает при больших скоростях ветра, а коэффициент теплообмена в этом случае растет только за счет того, что он является комбинацией коэффициента обмена импульсом и температурной шероховатости. Отмечено, что: 1) появление брызг приводит к резкому росту температурной шероховатости 2) брызги приводят к увеличению коэффициента обмена импульсом. Таким образом, можно сделать вывод что генерация брызг приводит к увеличению как обмена импульсом, так и теплом. Однако для теплообмена брызги играют решающую роль, т.к. в отличие от обмена импульсом, как было показано, он не зависит от формы подстилающей поверхности.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00265, 18-35-20068, 18-05-60299 (выполнение экспериментов) и РНФ 19-17-00209 (выполнялась обработка данных), работа Кандаурова А.А. поддержана грантом президента МК.3184.2019.5, эксперименты выполнены с использованием оборудования УНУ «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов».

1. Yu. I. Troitskaya, D.A. Sergeev, A.A. Kandaurov, G.A Baidakov, M.A. Vdovin, V.I. Kazakov Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // JGR. 2012. V. 117. C00J21, 13 P.

МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ БРЫЗГ ПО ДАННЫМ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая, М.И. Вдовин
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
e-mail: arfirius@yandex.ru

Капли брызг, образующихся при взаимодействии воздушных потоков с взволнованной водной поверхностью, играют важнейшую роль в процессах обмена импульсом, теплом и влагой между атмосферой и гидросферой. В лабораторных экспериментах по исследованию механизмов генерации брызг применяются достаточно сложные методы, например, в работе [1] использовался метод Phase Doppler Anemometry (PDA), а в работах [2, 3] использовалась скоростная видеосъемка, в том числе многоракурсная со сложной обработкой цифровых изображений. Однако, для экспресс-оценки интенсивности генерации брызг в зависимости от характеристик ветро-волновой обстановки требуется более простой способ.

В настоящей работе для косвенной оценки количества брызг в воздушном потоке был предложен оригинальный метод, основанный на эффекте резкого снижения показаний пленочного термоанемометра при попадании на него брызг. Пленочный термоанемометр E+E Electronics использовался для измерений профилей скорости и температуры в экспериментах на Ветро-волновом Термостратифицированном Бассейне ИПФ РАН. Проводились длительные (до 10 мин) записи его показаний на фиксированных горизонтах.

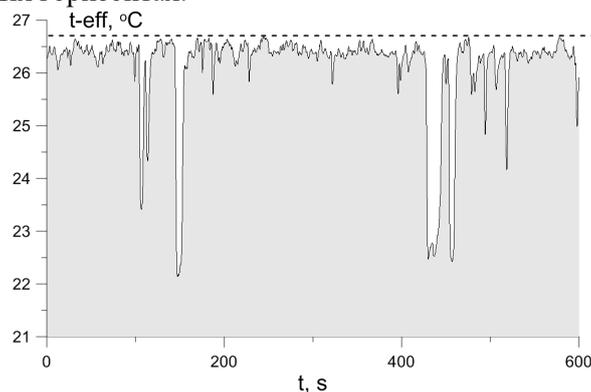


Рис.1 Пример полученного временного ряда.

После сглаживания временного ряда для устранения аппаратных шумов вычиталось максимальное значение температуры (найденное по всему ряду измерений и соответствующее сухому термоанемометру), из него вычитались текущие значения эффективной температуры. Далее вычислялся интеграл по всей временной записи. Интеграл вычислялся для нескольких горизонтов в диапазоне высот от минимально возможной (пока не захлестывает непрерывно), до высоты, где наблюдаются брызги. Построенные профили значения интеграла от высоты, хорошо аппроксимировались экспоненциальными зависимостями $\text{Integral} = I_0 e^{-\frac{z}{L}}$. Интерполируя значение на среднюю высоту гребней волн $a = H_s / 2\sqrt{2}$ получаем значение интеграла, используемое в качестве маркера интенсивности потока брызг в воздушном потоке над волнами.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00265, 18-35-20068, 18-05-60299 (выполнение экспериментов) и РНФ 19-17-00209 (выполнялась обработка данных), работа Кандаурова А.А. поддержана грантом президента МК.3184.2019.5, эксперименты выполнены с использованием оборудования УНУ «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов».

1. C. W. Fairall, M. L. Banner, W. L. Peirson, W. Asher, and R. P. Morison, 2009: Investigation of the physical scaling of sea spray spume droplet production. *J. Geophys. Res.*, 114, C10001.
2. Troitskaya, Y., A. Kandaurov, O. Ermakova, D. Kozlov, D. Sergeev, and S. Zilitinkevich, 2017: Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds. *Sci. Rep.*, 7, 1614.
3. F. Veron, C. Hopkins, E. L. Harrison, and J. A. Mueller Sea spray spume droplet production in high wind speeds 2012: *Geophys. Res. Letters*, 39, L16602.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А.А. Кандауров, Д.А. Сергеев, О.С. Ермакова, М.И. Вдовин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

e-mail: arfirius@yandex.ru

Морской аэрозоль в приповерхностном слое играет огромную роль в процессах обмена импульсом, теплом и газообмена. В настоящий момент мелкомасштабные быстропротекающие процессы обуславливающие механизмы образования брызг при ветро-волновом взаимодействии изучены слабо. В природных условиях это сделать практически невозможно, поэтому прибегают к моделированию на крупномасштабных ветро-волновых каналах. При этом наиболее перспективным методом регистрации событий представляется высокоскоростная видеосъемка со специальной визуализацией.

В настоящей работе приведены исследования, выполненные на Ветро-Волновом Термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН [1]. С помощью высокоскоростной видеосъемки и теневой подсветки были получены изображения, характеризующие процессы образования брызг. Теневые фотографии типичных событий, приводящих к генерации капель, показаны на Рис. 1 (а-в). Можно предложить их следующую классификацию:

1. Дробление жидких "пальцев" (Рис. 1а). В районе гребней обрушающихся волн развиваются небольшие выступы воды, которые затем растягиваются в «пальцы» и разрываются на одну-две капли диаметрами несколько миллиметров.

2. Разрыв подводных пузырей (Рис. 1б). Подводные пузыри, формирующиеся у гребней обрушающихся волн, всплывают из-за положительной плавучести и разрываются при достижении поверхности воды, генерируя брызги.

3. Дробление типа "парашют" (Рис. 1в). Это явление начинается с появления мелкомасштабного возвышения водной поверхности, затем развивающегося в «микро-парус», который раздувается и разрывается, образуя сотни брызг.

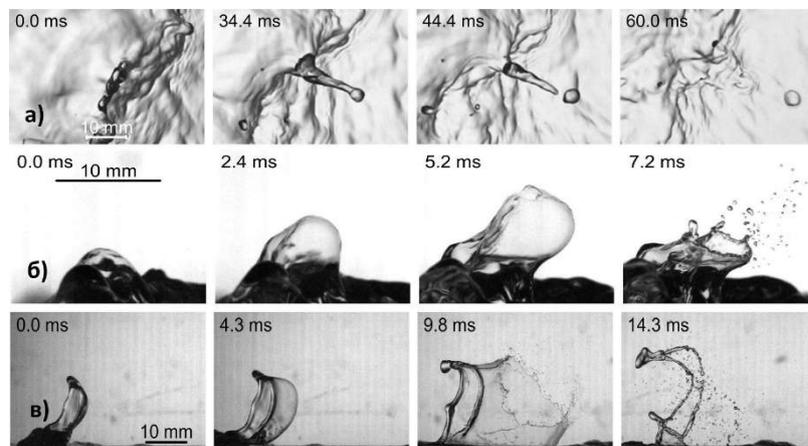


Рис. 1. Фотографии событий, сопровождающих генерацию брызг: а) дробление жидких "пальцев" (вид сверху); б) разрыв подводных пузырей (вид сбоку); в) нижний ряд фотографий – формирование и разрыв «парашюта» (вид сбоку).

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00265, 18-35-20068, 19-05-00249 (выполнение экспериментов) и РФФИ 19-17-00209 (выполнялась обработка данных), работа Кандаурова А.А. поддержана грантом президента МК.3184.2019.5, эксперименты выполнены с использованием оборудования УНУ «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов».

1. Troitskaya, Y., A. Kandaurov, O. Ermakova, D. Kozlov, D. Sergeev, and S. Zilitinkevich, // J. Phys. Oceanogr. 2018, V. 48, P. 2167–2188.

НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АЭРОУПРУГОЙ ДИВЕРГЕНЦИИ КРЫЛА

В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: vasily@vedeneev.ru

Существует два типа аэроупругой неустойчивости: дивергенция и флаттер. В то время как флаттер — колебательная потеря устойчивости, дивергенция — статическая неустойчивость, переход к которой происходит при нулевой частоте колебаний. Физический механизм дивергенции, описанный в литературе, состоит в снижении одной из собственных частот колебаний (как правило, крутильной) до нуля из-за отрицательной аэродинамической жесткости, слияния со своим «двойником» и преобразования в одно монотонно затухающее и одно монотонно растущее собственное движение. Большинство имеющихся в литературе примеров этого механизма используют квазистационарную аэродинамику, которая, на первый взгляд, подходит для анализа дивергенции в силу её статической природы.

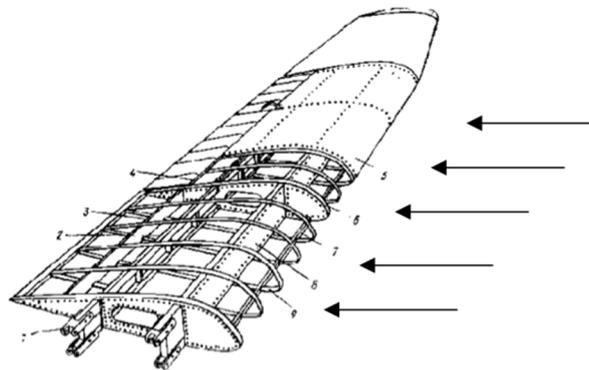


Рис. 1.

В настоящей работе доказывается, что при использовании нестационарной аэродинамики (теория Теодорсена) аналитическая структура собственных частот существенно меняется, и имеет место другой механизм перехода к дивергенции. А именно, частоты конструкционных колебаний не уменьшаются до нуля и не приводят к неустойчивости, а наоборот, становятся сильно затененными потоком газа. При этом дивергентная форма неустойчивости не является непрерывным продолжением собственного колебания крыла в покоящемся воздухе, а отделяется от непрерывного спектра, который существует в аэроупругой системе при использовании нестационарной аэродинамики, но отсутствует в квазистационарном случае.

Обсуждаются эффекты, возникающие в этом механизме перехода к дивергенции при использовании численных методов. Проводится сравнение с экспериментальными данными.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-31-20057.

1. Vedeneev V.V. New Mechanism of the Aeroelastic Divergence Onset// AIAA Journal. 2020. Vol. 58. No. 6. P. 2716-2725.

УЕДИНЁННЫЕ ВОЛНЫ В ГИПЕРУПРУГИХ ТРУБКАХ, СОДЕРЖАЩИХ ДВИЖУЩУЮСЯ ВЯЗКУЮ ЖИДКОСТЬ

В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: vasily@vedeneev.ru

Существует множество работ, посвящённых движению и устойчивости упругих трубок с текущей внутри жидкостью, которые находят приложения в ядерной энергетике, системах охлаждения и биомеханике. Исследовались как «жёсткие» трубки, теряющие устойчивость в форме изгибных колебаний [1, 2], так и «мягкие» [3], в которых происходят схлопывания поперёк сечения. В последнее десятилетие растёт интерес к стационарным и движущимся солитонам, которые могут возникать в трубках с текущей жидкостью [4, 5], поскольку они могут описывать возникновение аневризм кровеносных сосудов человека и животных. Ранее такие исследования проводились в предположении, что движущаяся жидкость идеальна.

В настоящей работе уравнения движения геометрически и физически нелинейной мембранной трубки с протекающей жидкостью, полученные в [4], обобщаются на случай вязкой и, вообще говоря, неньютоновской жидкости в предположениях [6, 7]. С помощью этой системы изучаются солитоноподобные решения в бесконечных, полубесконечных и конечных мембранных трубках из несжимаемого гиперупругого материала Гента.

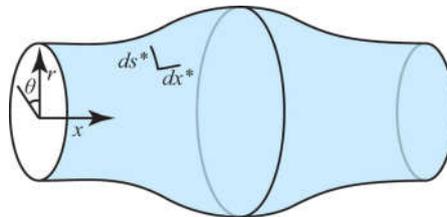


Рис. 1. Уединённая волна (солитон) расширения в упругой трубке, содержащей жидкость.

При движении вязкой жидкости в бесконечно длинной трубке доказано существование двух предельных состояний при $x \rightarrow -\infty$ и $x \rightarrow +\infty$ таких, что деформации стремятся к конечным значениям, а напряжения — к бесконечности, так чтобы компенсировать бесконечно растущее вверх по потоку (и бесконечно убывающее вниз по потоку) давление и растягивающую силу. Найден диапазон скоростей, в котором существует монотонный переход от одного состояния к другому в «центральной» части трубки (т.е., решение для всей трубки в целом). Доказано, что солитоноподобных решений не существует. Однако, такие решения существуют, если трубка неограниченна только в одном направлении, либо вверх, либо вниз по потоку. Решений в виде повторяющихся волн в таких трубках по-прежнему нет. Для трубок конечной длины существуют как солитоноподобные решения, так и решения в виде повторяющихся волн.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-29-10020.

1. Paidoussis, M.P. Fluid-structure interactions: slender structures and axial flow. V. 1. Acad. press, 1998.

2. Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарёв А.Т., Шклярчук Ф.Н. Аэрогидроупругость конструкций. М.: Физматлит, 2000.

3. Neil, M., Hazel, A.L. Fluid-Structure Interaction in Internal Physiological Flows. Ann. Rev. Fluid Mech. V. 43, p. 141-162, 2011.

4. M. Epstein, C. R. Johnston. On the exact speed and amplitude of solitary waves in fluid-filled elastic tubes. Proc. R. Soc. Lond. A. 2001. Vol. 457. P. 1195–1213.

5. Y.B. Fu, A.T. Plichev. Solitary waves in fluid-filled elastic tubes: existence, persistence, and the role of axial displacement. IMA Journal of Applied Mathematics. 2010. Vol. 75. P. 257--268.

6. А. Б. Порошина, В. В. Веденеев. Существование и единственность стационарного состояния упругой трубки при протекании через нее степенной жидкости// Российский журнал биомеханики. 2018. Т. 22. № 2. P. 196-222.

7. В. В. Веденеев, А. Б. Порошина. Устойчивость упругой трубки, содержащей текущую неньютоновскую жидкость и имеющей локально ослабленный участок// Труды МИАН. 2018. Т. 300. С. 42-64.

РАСТЕКАНИЕ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ С УЧЕТОМ ИХ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИЯХ ТРЕЩИННОГО ТИПА

Е.А. Веденева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
e-mail: el_vedeneeva@imec.msu.ru

Лавовые потоки зачастую движутся по уже извергнутому ранее материалу, на их поверхности за счет остывания может образовываться «корка», которая растрескивается и обрушивается перед потоком. В результате, в застывших потоках наблюдается подслон в виде лавобрекчии – породы, представляющей собой обломки лавы, ей же сцементированные [1], см. рис. При движении этот подслон, содержащий значительную долю обломков остывшей породы, в значительной мере не сцеплен с подстилающей поверхностью. В простейшей постановке это явление было учтено в рамках осесимметричной модели растекания лавы [2].

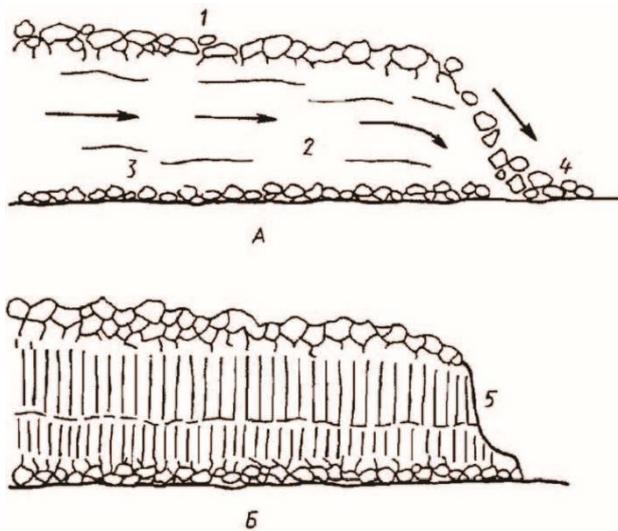


Рис. 11.5. Строение лавового потока:
А — поток во время движения; Б — после остывания; 1 — «аа»-лава, глыбовая корка, 2 — расплав внутренней части потока, 3 — лавобрекчия в подошве потока, 4 — скатывание застывших глыб с фронтальной части потока, 5 — столбчатая отдельность

Трещинные вулканы, или линейные вулканы, характеризуются тем, что излияние лавы на земную поверхность происходит по протяженным трещинам, они могут иметь вид цепи конусов. Извержения происходят вдоль всей трещины или в отдельных её частях.

В настоящей работе в плоской двумерной постановке рассматривается задача о растекании лавы как несжимаемой неньютоновской жидкости по плоской наклонной подстилающей поверхности – склону от точечного источника. На поверхности ставится обобщенное условие Навье – скорость на поверхности считается степенной функцией трения. Аналогично [2], в приближении тонкого слоя задача сводится к решению одного нелинейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка с интегральным условием. При существенном ограничении на параметры задачи найдено автомодельное решение, в общем случае решение строится численно. Рассматривается влияние параметров задачи на скорость

распространения лавовых потоков и их толщину.

Решение такой модельной задачи о течении вязкой жидкости с частичным проскальзыванием представляет интерес не только с точки зрения рассматриваемой проблемы. Частичное проскальзывание встречается для неньютоновских жидкостей, представляющих собой многокомпонентные системы, таких как концентрированные суспензии, эмульсии, гели и т.п., вязкие жидкости проскальзывают вдоль супергидрофобных поверхностей – см., например, [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 19-17-00027).

1. Короновский Н. В., Якушова А. Ф. Основы геологии: Учеб. для географ. спец. вузов. М.: Высш.шк., 1991. 416 с.

2. Веденева Е. А. Растекание лавы во время вулканических извержений при условии частичного проскальзывания на подстилающей поверхности // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 2. С. 27-40.

3. Malkin A. Ya., Patlazhan S. A. Wall slip for complex liquids – Phenomenon and its causes // Advances in Colloid and Interface Science. 2018. V. 257. P. 42-57.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАКАЧКИ ГАЗА И ВОДЫ В НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ

Е.А. Веденева, А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: el_vedeneve@imec.msu.ru

Исследуется эффективность газового воздействия на нефтяной пласт, в рамках моделирования смешивающегося вытеснения в пористой среде при закачке углеводородного (УВ) газа. Для описания течения в пористой среде, используется композиционная модель фильтрации, позволяющая учесть изменения компонентного состава жидкостей и газов в пласте, теплофизические свойства которых задаются уравнением состояния Ван-дер-Ваальсового типа. Эффективность нефтеотдачи сравнивается с получаемой при применении традиционной технологии заводнения. Для проведения исследований разрабатывающийся авторами комплекс программ MUFITS [1,2] дополнен модулем для композиционного моделирования фильтрации. На данном примере демонстрируются его обновленные функциональные возможности. В модели учитывается, что в зависимости от давления и температуры УВ смесь находится либо в однофазном состоянии газа или жидкости (нефти), либо в двухфазном состоянии газ–нефть. Вода же не смешивается с УВ, образуя отдельную компоненту жидкости. Давление во всех фазах считается одинаковым – капиллярное давление пренебрежимо мало, изменение температуры – тоже. Течение происходит в тонком горизонтальном пласте, влиянием силы тяжести пренебрегается.

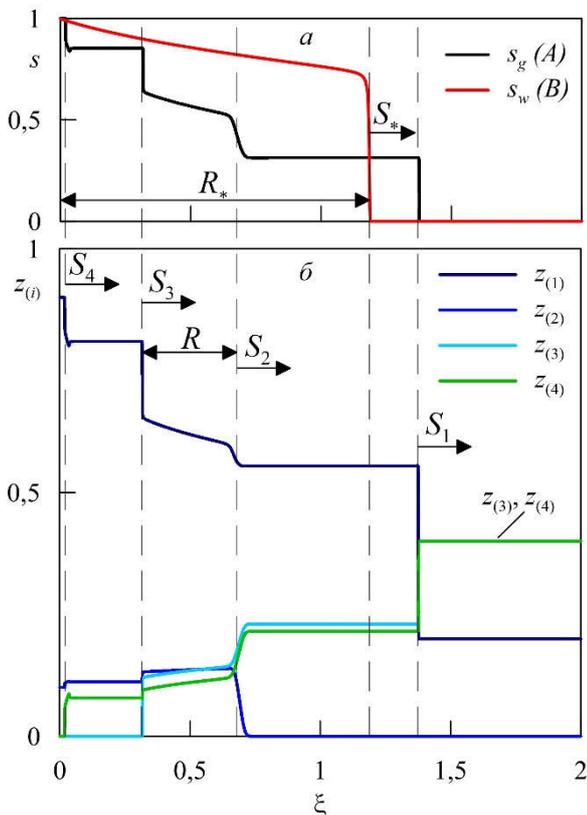


Рис. Распределения насыщенностей газа и воды в случаях *A* и *B* (*a*) и полных мольных концентраций в задаче *A* (*b*), соответственно.

Рассматриваются модельные составы нефти и вытесняющего газа, совпадающие с одними из предложенных в [3] – случай *A*. По постановке задача является автомодельной задачей Римана. Её решение состоит из последовательности сильных разрывов (S), на которых рвутся распределения насыщенностей газа s_g и воды s_w , полные концентрации компонент смеси z_i ; центрированных волн Римана (R) и областей однородного распределения параметров, распространяющихся от входной границы внутрь области ($S_4-S_3RS_2-S_1$). В случае *B* в пласт закачивается вода, а решение содержит только один разрыв и одну волну Римана ($R*S_*$) – случай *B*. Результаты численного моделирования приведены на рис.

Исследованы характерные времена, на которых закачка газа позволяет извлечь наиболее ценные УВ компоненты нефти. Показано, что закачка воды в целом более эффективный метод повышения нефтеотдачи из пластов, насыщенных нефтью рассмотренного модельного состава. Газовое воздействие позволяет извлечь дополнительное количество промежуточных компонент УВ ряда только после закачки 3 поровых объемов газа. Однако, это дополнительное количество мало и, по-видимому, не имеет практической значимости. Еще меньший эффект достигается при вытеснении тяжелых компонент.

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

1. Afanasyev A.A. Hydrodynamic modelling of petroleum reservoirs using simulator MUFITS // Energy Procedia. 2015. V. 76. P. 427–435.

2. Afanasyev A., Kempka T., Kühn M., Melnik O. Validation of the MUFITS reservoir simulator against standard CO₂ storage benchmarks and history-matched models of the Ketzin pilot site // Energy Procedia. 2016. V. 97. P. 395–402.

3. Orr F.M. Theory of gas injection processes. Holte, Denmark: Tie-Line Publications, 2007. 381 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО ТИПА МИКРОМИКСЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛЫ

Г.С. Ганченко¹, Н.Ю. Ганченко², В.С. Шелистов¹, Н.В. Никитин³

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

² Кубанский государственный университет, Краснодар

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

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

В последнее время наблюдается активное развитие исследований в области медицинской и химической диагностики в микропробах. Подобного рода анализы производят в микролабораториях на чипе, в которых с помощью систем микро-наноканалов происходит транспорт, смешивание и анализ рабочих жидкостей. Ввиду малых масштабов, управление жидкостью в таких лабораториях является сложной задачей, имеющей целый ряд фундаментальных проблем. Одной из таких проблем является задача смешивания двух жидкостей. В микроканалах даже смешивающиеся жидкости могут достаточно долго протекать в расслоенном виде, а конвективное перемешивание незначительно, в силу малых чисел Рейнольдса.

В данном докладе будут представлены результаты математического моделирования оригинальной конструкции микромиксера, который геометрически представляет собой сферическую микрокамеру с двумя отверстиями для входа и выхода жидкости. В середине камеры располагается ионоселективная микрогранула, закрепленная в середине камеры на оси входного и выходного отверстий. В качестве рабочей жидкости рассматривается бинарный электролит. На входе подается расслоенный электролит с различной концентрацией соли во внутренней и внешней части входного отверстия. Жидкость в движение приводится как за счёт внешнего градиента давления, так и за счёт внешнего перепада электрических потенциалов.

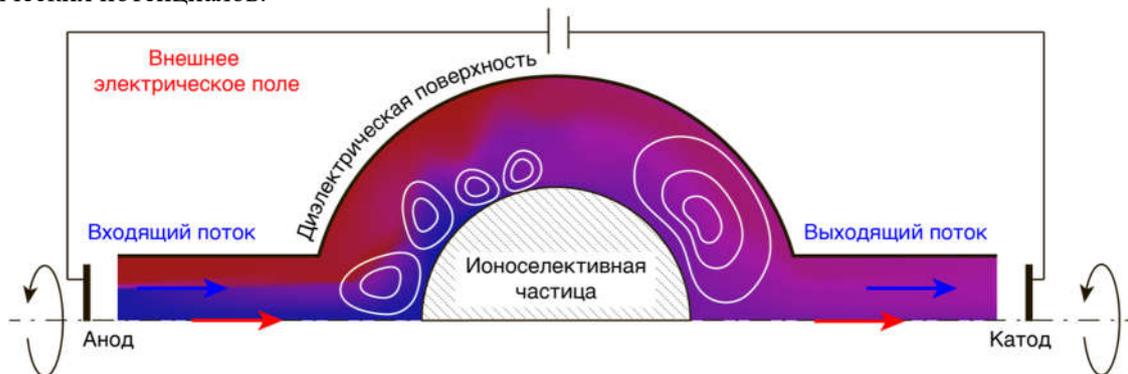


Рис. Схематичная конфигурация микромиксера.

Перемешивание в камере происходит за счёт внешнего электрического поля и особых свойств ионоселективной микрогранулы [1,2]. Как показывают исследования, около такой частицы возникает большая зона пространственного заряда, которая приводит к возникновению различного рода неустойчивостей и образованию вихревого движения электролита, вплоть до стохастических режимов при достаточно большой напряженности внешнего электрического поля [2,3].

Поведение в условиях описанной выше конфигурации моделировалось в осесимметричной постановке относительно оси входного и выходного отверстий с помощью численного алгоритма решения системы Нернста-Планка-Пуассона-Стокса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края, проекты № 19-48-233010-р_мол_а.

1. Frants E.A., Ganchenko G.S., Shelistov V.S., Amiroudine S., Demekhin E.A. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30, No 2. P. 022001.
2. Ganchenko G., Frants E., Shelistov V., Nikitin N., Amiroudine S., Demekhin E. Extreme nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule // *Phys. Rev. Fluids*, 2019. Vol. 4, No 4. P. 043703.
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 (принято в печать).

УСТОЙЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО СЛЕДА ЗА ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛОЙ ПРИ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ ВТОРОГО РОДА

Е.А. Франц¹, В.С. Шелистов¹, В.А. Попов², Г.С. Ганченко¹

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Одной из фундаментальных проблем при проектировании лабораторий на чипе для медицинской диагностики является проблема малых концентраций аналита в микропробах. Большинство биологических пептидов и макромолекул имеют очень низкую концентрацию в пробах, поэтому для их детектирования необходимо предварительное локальное концентрирование. В экспериментальной работе [1] наблюдался эффект суперконцентрации, когда на полюсе ионоселективной микросферы наблюдалось увеличение концентрации пептидов.

Наши теоретические работы [2,3] по исследованию электрофореза ионоселективной микросферы качественно подтвердили этот результат и показали, что за микрогранулой при достаточно большой напряженности внешнего электрического поля образуется зона повышенной концентрации соли. С учётом движения микрогранулы, за ней образуется концентрационный след, распространение которого имеет автомодельный характер.

Концентрационный след за частицей, несмотря на электронейтральность, вызывает остаточный заряд, так как порождает неоднородность электрической проводимости электролита. В результате при достаточно большой напряженности поля концентрационный след может терять устойчивость вблизи микрогранулы, где градиент концентрации наибольший. Возникающие неоднородности переносятся вдоль по потоку. В упрощенной постановке получено стационарное автомодельное решение и проведен линейный анализ его устойчивости.

Качественно такой механизм неустойчивости похож на электрокинетическую неустойчивость, вызванную градиентом концентрации [4].

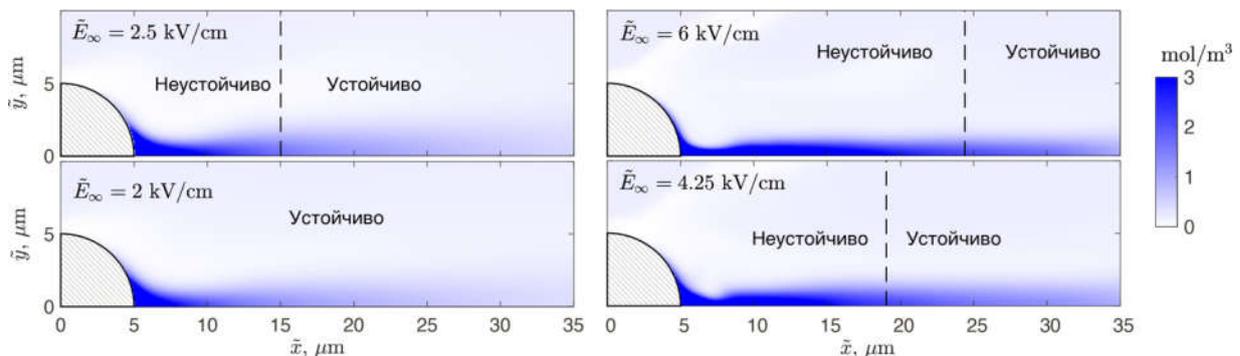


Рис. Мгновенные распределения концентрации за микрогранулой для различных значений напряженности внешнего электрического поля.

Пунктирная линия соответствует условной границе между неустойчивой и устойчивой областями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края, проекты №№ 19-48-233009-р_мол_a, 18-58-15004-НЦНИ_a.

1. Wang S.-C. и др. Dynamic superconcentration at critical-point double-layer gates of conducting nanoporous granules due to asymmetric tangential fluxes. // *Biomicrofluidics*. 2008. Т. 2. № 1. С. 14102.

2. Frants E.A., Ganchenko G.S., Shelistov V.S., Amiroudine S., Demekhin E.A. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30, No 2. P. 022001.

3. Ganchenko G., Frants E., Shelistov V., Nikitin N., Amiroudine S., Demekhin E. Extreme nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule // *Phys. Rev. Fluids*, 2019. Vol. 4, No 4. P. 043703.

4. Chen C.-H. и др. Convective and absolute electrokinetic instability with conductivity gradients // *J. Fluid Mech*. 2005. Т. 524. С. 263–303.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА

Г.С. Ганченко¹, В.А. Артюхов¹, Р.Р. Пономарёв², Е.А. Демёхин^{1,3}

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

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

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Использование ионоселективных поверхностей для решения проблем микрофлюидики позволило по-новому взглянуть на проблемы транспорта жидкостей в микроканалах. Большой объёмный заряд, который образуется в результате концентрационной поляризации около ионоселективной поверхности, приводит к увеличению электроосмотической скорости в несколько раз. Однако вместе с тем такие течения оказываются менее устойчивыми, по сравнению с электроосмосом около диэлектрической поверхности. Основным механизмом неустойчивости является электрокинетический [1], который в настоящее время активно исследуется. Модель электрокинетической неустойчивости постоянно расширяется для учёта дополнительных эффектов. В недавних работах было показано [2-4], что если отказаться от гипотезы идеальной селективности, то есть допустить наличие потока коионов сквозь поверхность, то можно наблюдать качественно новые режимы электроконвекции, вплоть до колебательного [3,4].

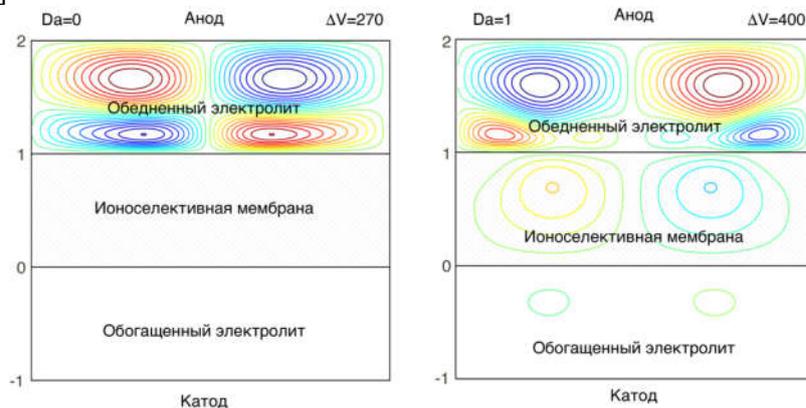


Рис. Мгновенные линии тока для случая нулевого числа Дарси (слева) и ненулевого (справа). Разность потенциалов ΔV пришлось увеличить в полтора раза для получения аналогичного режима.

В данном докладе будет представлено следующее обобщение математической модели, которое предполагает наличие гидродинамического течения внутри пористой среды ионообменной мембраны. Для этого в модель было добавлено уравнение Дарси-Бринкмана [5] внутри мембраны. Был проведен линейный анализ устойчивости одномерного стационарного решения, а также двумерное численное моделирование для выявления нелинейных режимов.

Результаты исследования ожидаемо показывали, что движение в жидкости в мембране в большей степени приводит к стабилизации течения, однако увеличение критического значения разности электрических потенциалов происходит немонотонно: с увеличением числа Дарси сначала происходит небольшая дестабилизация, и только для достаточно больших чисел Дарси наблюдается значительная стабилизация.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-01158-а.

1. Rubinstein I., Zaltzman B. Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // Phys. Rev. E. 2000. Т. 62. № 2. С. 2238–2251.
2. Rubinstein I., Zaltzman B. Equilibrium Electroconvective Instability // Phys Rev Lett. 2015. Т. 114. № 11. С. 114502–5.
3. Ganchenko G.S. и др. Modes of electrokinetic instability for imperfect electric membranes // Phys. Rev. E. 2016. Т. 94. № 6. С. 063106–8.
4. Demekhin E.A., Ganchenko G.S., Kalaydin E.N. Transition to electrokinetic instability near imperfect charge-selective membranes // Phys Fluids. 2018. Т. 30. № 8. С. 082006–19.
5. Beavers G.S., Joseph D.D. Boundary conditions at a naturally permeable wall // J. Fluid Mech. 2006. Т. 30. № 1. С. 197–207.

СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПЕРЕДАЧ В МОДЕЛИ СУДОВОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

М.А.Гарбуз^{1,2}

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

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

e-mail: misha-garbuz@yandex.ru

Рассматривается математическая модель одноосного судового ветродвигателя с трансмиссией, продолжающая исследование [1]. Основу такого ветродвигателя составляют два горизонтально расположенных вала, соединённых между собой трансмиссионным блоком передачи вращения (рис.1). На конце верхнего вала закреплён ветроприёмный пропеллер, а на конце нижнего – подводный гребной винт. Для описания пропеллера и гребного винта рассматриваются результаты реальных экспериментов для корабельных гребных винтов и пропеллеров от ветроэнергетических установок [4,5].

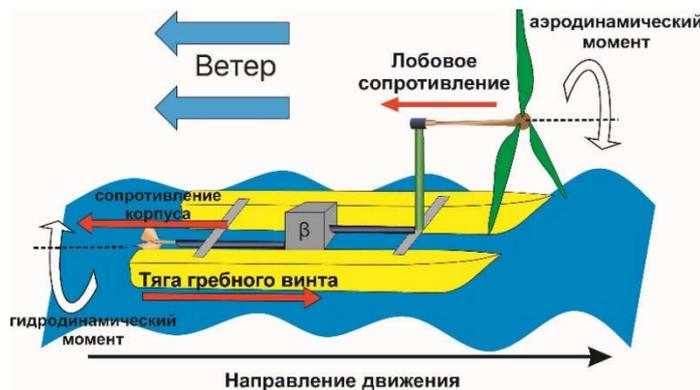


Рис. 1. Модель ветродвигателя с трансмиссией.

В работе проанализировано влияние учёта гидродинамического сопротивления корпуса, найдено оптимальное значение коэффициента передачи вращения от пропеллера к винту, при котором катамаран развивает теоретически максимальную скорость против ветра. Исследованы преимущества разных коэффициентов передачи и произведено численное моделирование выхода катамарана из состояния покоя на режим движения «против ветра» при помощи переключения передач. Найдена возможная стратегия перехода на предпочтительный режим движения (рис.2).

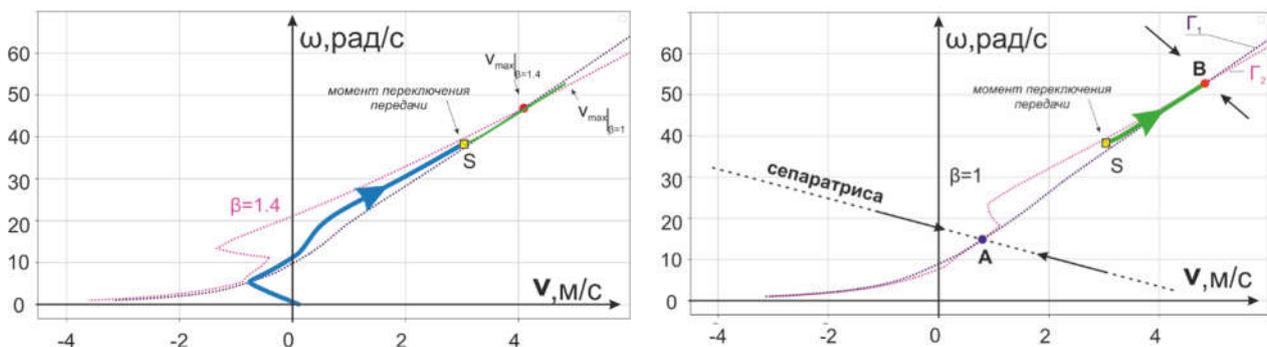


Рис. 2. Возможная стратегия переключения передач.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка методов исследования управляемых механических систем, взаимодействующих со сплошной средой» (AAAA-A19-1190129901230) и гранта РФФИ №18-31-20029.

1. Гарбуз М.А. Катамаран, движущийся против ветра при помощи противовращающихся пропеллерных ветродвигателей. – Сборник трудов КМУ 2018., Издательство Московского университета 2019, Москва, том 1, с. 69-76.

2. Я.И. Войткунский. Справочник по теории корабля. Том 1. Ленинград 1986.

3. Adaramola, M.S., Krogstad, P.A. Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance. Renewable Energy, 2011, 36(8), pp 2078-2086.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРУГЛОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

В.В. Веденеев^{1,2}, Л.Р. Гареев², Ю.С. Зайко², А.И. Решмин², В.В. Трифонов², А.Д. Чичерина²

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

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

e-mail: gareev.lr@yandex.ru

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию развития возмущений в круглой ламинарной струе, а также некоторым методам их измерения. Исследования проводились на базе лаборатории экспериментальной гидродинамики НИИ Механики МГУ на устройстве, формирующем круглую затопленную ламинарную струю.

В линейной теории устойчивости пристенных сдвиговых потоков всего лишь несколько классических результатов были подтверждены экспериментально, например, пограничный слой Блазиуса [1], течение Пуазейля в круглой трубе [2], плоское течение Пуазейля [3]. Устойчивость струйных потоков и рост возмущений в них изучены гораздо меньше из-за низких критических чисел Рейнольдса Re и разрушения свободных струй на выходе из отверстия. Недавно авторами был представлен метод создания ламинарных струй воздуха диаметром $D = 0.12$ м, сохраняющих слоистую структуру на расстоянии $5.5 D$ от выходного отверстия для чисел Рейнольдса $Re \sim 10000$ [4]. Схема установки представлена на рисунке.

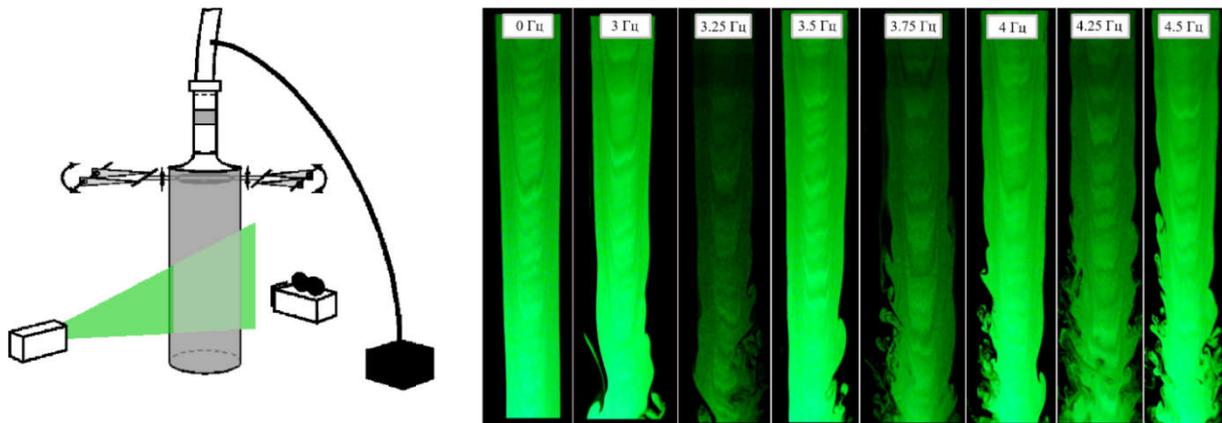


Рис. Схема экспериментальной установки и некоторые результаты визуализации.

В настоящей работе проведена серия экспериментов с визуализацией струи лазерным ножом, направленная на исследование развития возмущений, генерируемых колебаниями металлического кольца, и последующая обработка полученных результатов. Диаметр кольца подбирался таким образом, чтобы локальные возмущения генерировались в точке перегиба профиля скорости, согласно линейной теории устойчивости. Получены и проанализированы длины и частоты волн, видимых на боковых краях течения. Имеет место качественное и во многом количественное подтверждение теоретических расчетов. Также была проведена серия термоанемометрических измерений. Была найдена зависимость профиля скорости и относительных пульсаций скорости от расстояния от диффузора. Результаты экспериментов показывают соответствие развития возмущений линейной теории устойчивости.

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

1. A.V. Boiko, K.J.A. Westin, B.G.B. Klingmann, V.V. Kozlov and 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: 219-245, 1994.

2. B. Eckhardt. Introduction. Turbulence transition in pipe flow: 125th anniversary of the publication of Reynolds paper // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 367: 449-455, 2009.

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

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ЭМБОЛИЗАЦИИ АВМ С ПЕРЕТОКАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Т.С. Гологуш¹, А.А. Черевко^{1,2}, В.В. Остапенко^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

e-mail: tatiana_06.08@mail.ru

Артериовенозная церебральная 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 специальной эмболизирующей композицией (рассматривается ОНУХ) с целью блокирования кровотока через них. Данный способ хирургического вмешательства широко применяется, но до сих пор в некоторых случаях сопровождается интраоперационным разрывом сосудов мальформации. В работе математически моделируется данный процесс и строится оптимизационный алгоритм.

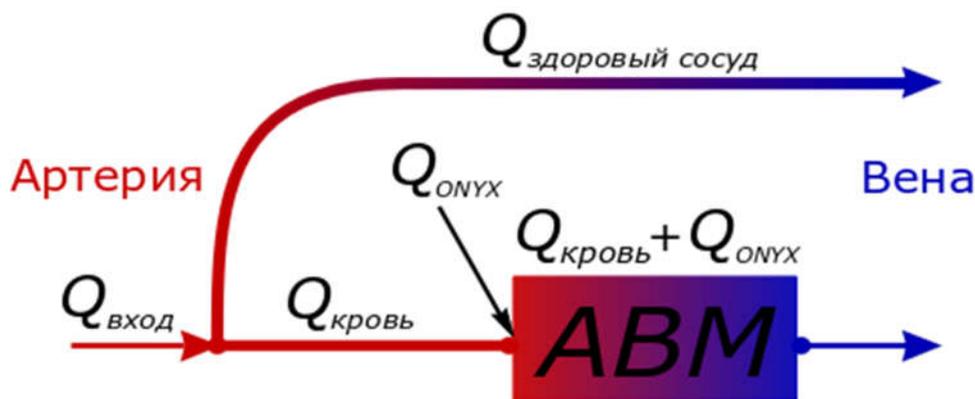


Рис. Комбинированная модель эмболизации АВМ, включенная в систему церебрального кровообращения.

Для описания процесса эмболизации предлагается комбинированная модель, в которой наряду с течением крови и ОНУХ в АВМ учитывается переток крови в окружающие здоровые сосуды. Процесс эмболизации моделируется как процесс двухфазной фильтрации несмешивающихся несжимаемых жидкостей, где вытесняемой фазой является кровь, а вытесняющей ОНУХ, и используется уравнение Баклея-Левретта, которое решается численно с помощью монотонной модификации схемы Кабаре [1]. Поток крови, поступающий в АВМ, меняется во время операции за счет перераспределения крови в соседние здоровые сосуды, в модели этот эффект учитывается путем введения дополнительных соотношений.

Основная цель работы заключается в отыскании оптимального с точки зрения безопасности и эффективности сценария эмболизации артериовенозной мальформации. Целевой функционал и ограничения, возникающие в такой задаче оптимального управления, выбираются в соответствии с медицинскими показаниями. Управлением является зависящая от времени функция, определяющая объемный расход эмболизирующего вещества на входе в АВМ. Сформулирована и для специального закона подачи ОНУХ решена задача оптимального управления эмболизацией.

При изучении задачи оптимальной эмболизации использовались функции Баклея-Левретта, построенные с помощью приближения клинических данных, полученных во время мониторинга гемодинамических параметров во время нейрохирургических операций в НМИЦ им. Мешалкина [2].

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

1. Cherevko A.A., Gologush T.S., Petrenko I.A., Ostapenko V.V. Numerical modeling process of embolization arteriovenous malformation // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893. №. 1. P. 030123.

2. Khe A.K. et al. Monitoring of hemodynamics of brain vessels // J. App. Mech. Tech. Phys. 2017. Vol. 58. P. 763–770.

ОЦЕНКА ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

А.П. Голуб

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: holub.imech@gmail.com

В работе рассматривается, как преобразовать механическую энергию в электрическую, для ветроэнергетических установок колебательного типа. В качестве ветроприёмного устройства используется двухзвенный аэродинамический маятник. О его динамике достаточно подробно написано в работах [1-3]. Где, в частности, показано, что при определённых значениях параметров, маятник может совершать периодические движения, с которых возможно снимать энергию. Предполагается, что съём энергии производится с помощью генератора на первом звене, так как ось вращения этого звена неподвижна, в отличие от оси вращения второго звена. Поэтому воздействие генератора вводится, как демпфирование d в первом шарнире.

Для некоторых параметров системы результаты численного моделирования достаточно хорошо количественно согласовывались с экспериментом ($V=13$ м/с. $R=16,5$ см). Для таких параметров и была дана оценка энергии, которую можно снимать с данного объекта. При отсутствии пружин на первом звене положение равновесия «по потоку» было асимптотически устойчиво. При увеличении k_1 – жёсткости пружины на первом звене, частота автоколебаний увеличивалась. Амплитуда первого звена вначале увеличивалась, а затем уменьшалась с ростом k_1 . В связи с этим, интересуют параметры, при которых была наибольшая амплитуда колебаний и следующие далее, то есть значения $k_1=1.6, 3.2$ и 6.4 (подробнее в [2-3]). Менялось лишь значение коэффициента d .

Проведено численное исследование зависимости коэффициента полезного действия C_p от параметра d .

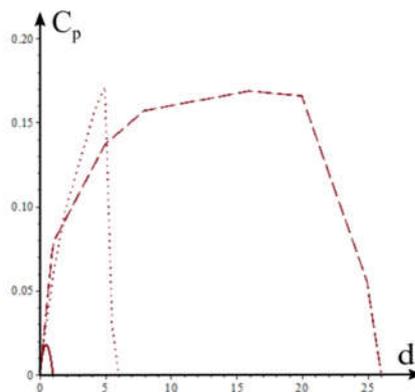


Рис.1. Зависимость C_p от d .

Сплошная линия для $k_1 = 1.6$, точки для $k_1 = 3.2$, штрих для $k_1 = 6.4$.

На Рис.1 представлена эта зависимость для трёх пружин, которые были рассмотрены выше. Для случая $k_1 = 1.6$ значение C_p мало, а для $k_1 = 3.2$ и 6.4 , в определённом диапазоне C_p достигает значений $0.15-0.17$. При этом для $k_1 = 3.2$ диапазон d для «оптимальных» C_p мал, а для $k_1 = 6.4$ диапазон d существенно больше. Поэтому введение пружины на первом звене приводит не только к потере устойчивости, но и к увеличению коэффициента C_p .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №17-08-01366, 18-31-20029).

1. Голуб А.П., Селюцкий Ю.Д. О влиянии жёсткости крепления на динамику двухзвенного аэродинамического маятника // Доклады Академии Наук. 2018. Том 481. №3. С. 254-257.

2. Голуб А.П. Экспериментальное исследование упруго-закрепленного аэродинамического двухзвенного маятника // Труды конференции-конкурса молодых учёных НИИ механики МГУ. 2018. С. 77-81.

3. Голуб А.П. Диссертация на соискание учёной степени к.ф.-м.н. Динамика двухзвенного аэродинамического маятника // МГУ имени М.В. Ломоносова. 2019.

ТЕПЛООБМЕН В СВЕРХЗВУКОВОМ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВБЛИЗИ СТЕНКИ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ КАНАЛА

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

Рассматривается сверхзвуковое течение двухкомпонентной смеси «газ-капли» в плоском линейно расширяющемся канале с теплоизолированными стенками. Задача состоит из двух частей: в первой исследуется невязкий двухфазный поток вдали от стенки с целью найти такие соотношения определяющих параметров, которые соответствуют наиболее интенсивному росту капель благодаря процессу конденсации. Вторая часть – исследование движения капель и межфазного теплообмена в пограничном слое на стенке канала. Цель работы – определить, насколько возможно снижение равновесной температуры теплоизолированной стенки из-за наличия в потоке дисперсной фазы.

Для исследования характера газочапельного потока используется двухконтинуальная модель с фазовыми переходами на поверхности капель [1]. Считается, что во всей рассматриваемой области температура жидкости на поверхности и внутри капель не меняется. Для определения параметров потока вдали от пластины решаются квазиодномерные невязкие уравнения двухфазной среды с учетом обратного влияния и процесса конденсации. Установлено, что наиболее интенсивный рост капель происходит при малых значениях относительной массовой концентрации капель, а также при больших значениях параметра расширения канала.

Для исследования течения вблизи стенки используются уравнения теории двухфазного ламинарного пограничного слоя с малой объемной долей жидкой фазы [2]. В межфазном обмене импульсом, помимо силы аэродинамического сопротивления, учитывается боковая сила Сэфмана, под воздействием которой капли могут выпадать на обтекаемую поверхность. Уравнения двухфазного пограничного слоя решаются численно методом прогонки. Для численного интегрирования уравнений используется неявная разностная схема с первым порядком аппроксимации по продольной координате и вторым порядком - по поперечной.

В результате численных расчетов построены поля параметров фаз, такие как температура газа, размер и концентрация капель, а также графики изменения равновесной температуры стенки. На рисунке приведены картины распределения температуры несущей фазы в пограничном слое для чистого газа и газа с примесью капель. Во втором случае наблюдается охлаждение газа вблизи стенки по сравнению со случаем чистого газа.

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

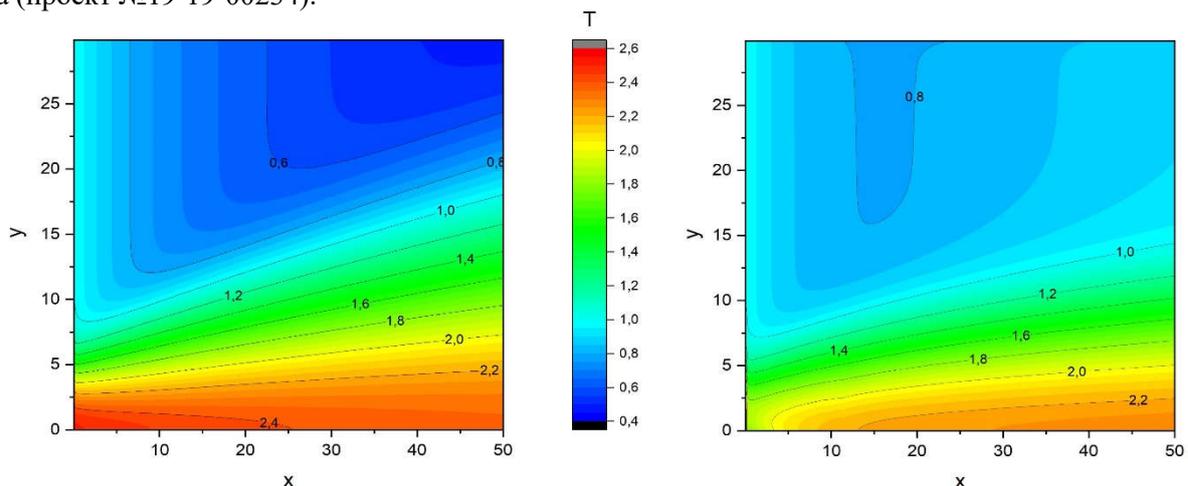


Рис. Распределение температуры несущей фазы в пограничном слое в случае течения чистого газа (слева) и газа с примесью капель (справа).

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ НАГРЕВАТЕЛЯ КУБИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

М.М. Гончаров, М.О. Кучинский, А.Н. Кондрашов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: goncharov.m.m@mail.ru

В работе [1] проведено численное исследование ламинарной нестационарной естественной конвекции в замкнутой кубической полости, имеющей локальный источник тепла различной геометрической формы. Для такой системы с цилиндрическим компактным нагревателем предложена численная модель, которая предсказывает возникновение двух противовращающихся тороидальных вихрей.

Для подтверждения наличия такой особенности был поставлен эксперимент, схема которого представлена на рис. 1. Кювета 2 представляет собой стеклянный параллелепипед высотой 25 см с квадратным основанием со стороной 19 см. В центре нижнего основания кюветы расположен медный кубический нагреватель со стороной 2.4 см. В качестве рабочей жидкости выступает вода при нормальных условиях. Для регулирования температуры используется электрический нагреватель на основе PID регулятора 4.

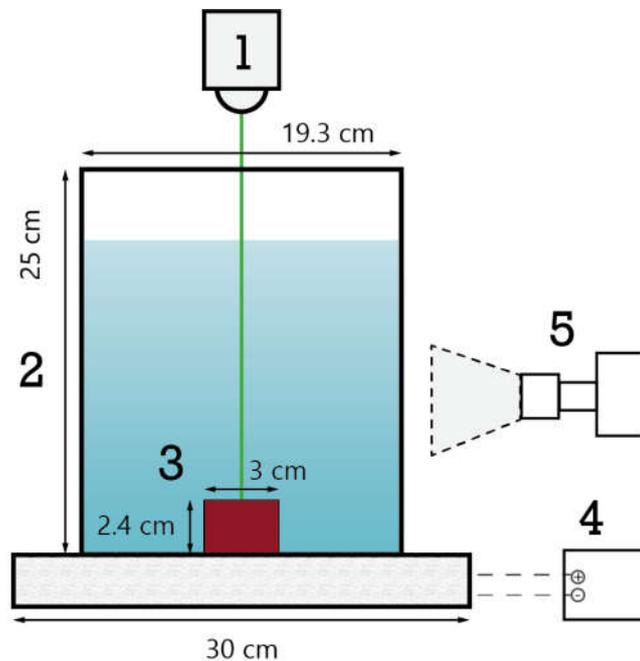


Рис. Экспериментальная установка: 1- лазер, 2 – кювета, 3 – нагреватель, 4 – PID регулятор, 5- камера.

В ходе эксперимента с помощью лазера 1 и цилиндрической линзы был получен лазерный нож, вырезающий исследуемую область в центре кюветы. С использованием камеры 5 и флуоресцентного красителя изучалась структура установившегося конвективного течения. Для получения поля скорости жидкости в центральном сечении кюветы, использовались полиамидные светоотражающие частицы и метод PIV.

1. Gibanov N. S., Sheremet M. A. Natural convection in a cubical cavity with different heat source configurations //Thermal Science and Engineering Progress. – 2018. – Т. 7. – С. 138-145.

ДИНАМИКА ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ НАХОДЯЩИХСЯ В ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДЕГАЗАЦИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

М.М. Гончаров, М. В. Козлов, О.О. Фатталов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: goncharov.m.m@mail.ru

Динамика возникающих в жидкости кавитационных пузырьков зависит от различных факторов, могут наблюдаться как коллапс пузырьков, так и их коалесценция и длительное существование относительно крупных пузырьков, как в объеме жидкости, так и вблизи твердых поверхностей [1].

Дегазация жидкости — процесс уменьшения содержания газа в жидкости. На данный момент существуют химические и физические способы дегазации. В основе химических методов удаления из воды, растворенных газов лежит их химическое связывание, достигаемое введением реагентов или фильтрованием через специальные загрузки. Сущность физических методов дегазации заключается в следующем: вода, содержащая удаляемый газ, приводится в соприкосновение с воздухом, если парциальное давление этого газа в воздухе близко к нулю; создаются условия, при которых растворимость газа в воде становится ничтожно малой.

В данной работе рассматривается ультразвуковой способ дегазации жидкости. При ультразвуковой обработке жидкости создается большое количество малых пузырьков, в которые мигрирует растворенный газ и увеличивает размер этих пузырьков. Далее, за счет силы Архимеда пузырьки поднимаются на поверхность воды и высвобождают находящийся внутри газ во внешнюю среду.

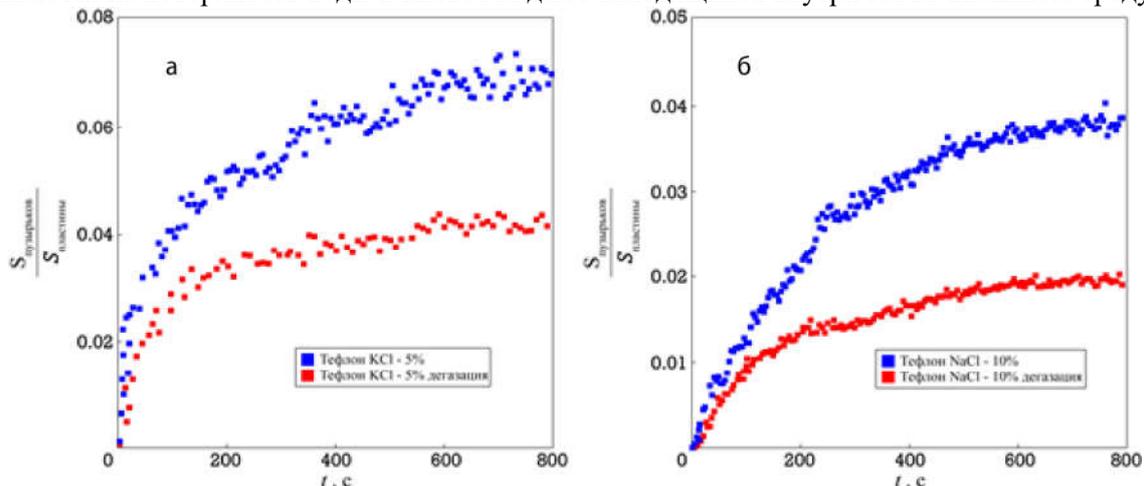


Рис. Влияние дегазации на зависимость относительной площади поверхности, покрытой пузырьками от времени воздействия УЗ для растворов а) KCl и б) NaCl.

В настоящей работе проведены эксперименты по изучению динамики парогазовых пузырьков, дрейфующих вблизи твердых поверхностей под действием ультразвука с использованием дистиллированной воды, а также растворами NaCl и KCl с различными концентрациями, для пластин из аморфного кварца, органического стекла и тефлона. Разработана методика оценки площади поверхности пластины, покрытой пузырьками.

Эксперименты показали, что на скорость роста площади, занимаемой пузырьками, существенно влияет степень дегазации воды. При длительной дегазации воды пузырьковые кластеры на поверхности оргстекла практически не образуются. Однако, на поверхности тефлона можно выделить несколько зон в которых наблюдалось устойчивое прикрепление пузырьков, возможно, вследствие диффузии воздуха с открытой поверхности жидкости в кювете.

Экспериментально подтверждено различие в динамике роста площади, покрытой пузырьками, для тефлона и оргстекла. Результаты работы могут найти применение при объяснении влияния дегазации растворов на качество флотации руд, в частности сальвинитовой руды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-31-90138).

1. K.A. Rybkin, Yu. K. Bratukhin, T. P. Lyubimova 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. — Vol. 879. — 2017. — P. 012026.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗ – ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВИДЕ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: GorokhovaNV@imec.msu.ru

Вулканические молнии часто наблюдаются при крупных взрывных извержениях. Они возникают в результате электризации частиц пепла при достижении некоторой критической напряжённости электрического поля. Одной из основных причин электризации частиц является их трение и столкновение. Неоднородность течения оказывает основное влияние на величину накапливаемого частицами заряда и распределение частиц в пространстве. Истечение газо-пепловой смеси из жерла вулкана является сильно неоднородным, турбулентным течением. Наиболее простой моделью такого течения является модель затопленной струи несжимаемой жидкости или газа в плоском или осесимметричном случаях.

В этой работе модель течения смеси газа и заряженных частиц с учётом их взаимодействия и электризации применена для случая плоской стационарной затопленной струи несжимаемой жидкости в предположении, что движение частиц не влияет на течение несущей среды. При описании движения частиц используется подход Лагранжа: частицы движутся под действием силы тяжести, гидродинамических и электростатических сил. Частицы взаимодействуют (соударяются) друг с другом с изменением скоростей движения и зарядов. Заряд, передаваемый при ударе, зависит от упругих и электрических свойств материала частиц, их размеров и скоростей. Исследуется эволюция электрического поля в процессе течения. Проводится оценка количества и концентрации частиц, при которых напряжённость поля достигает критических значений самостоятельного разряда или молнии.

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. Vol. 2. Pergamon Press, Oxford. 1971. P. 61-149.

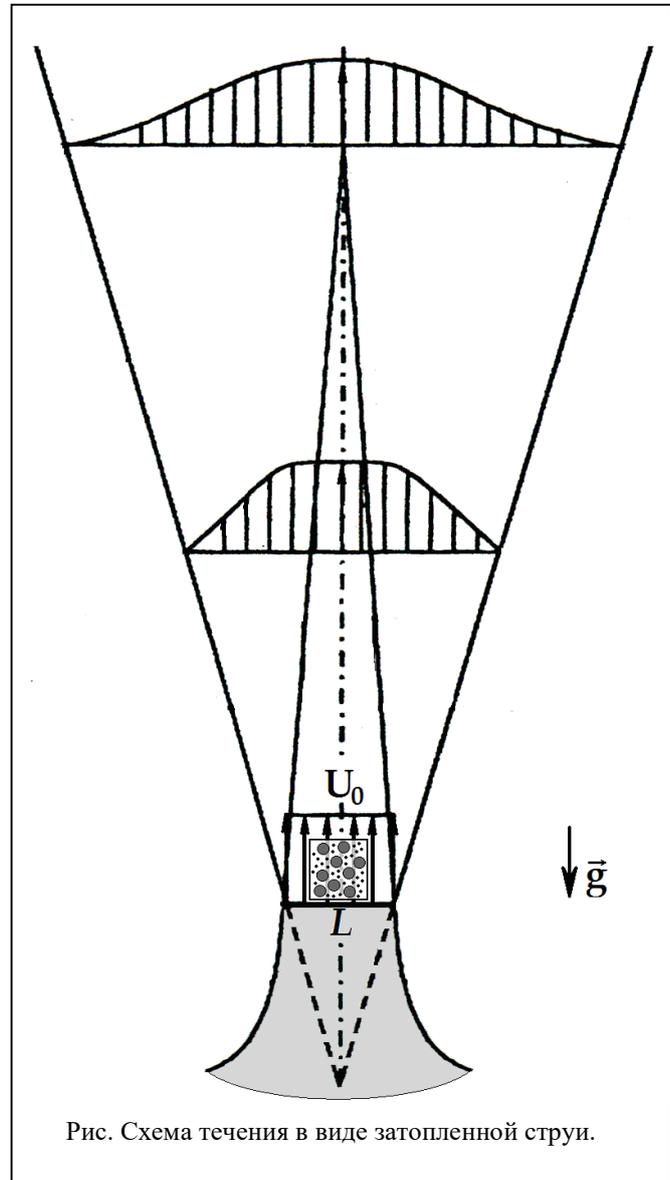


Рис. Схема течения в виде затопленной струи.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: GorokhovaNV@imec.msu.ru

Ранее была построена модель течения смеси газа и заряженных частиц с учётом их взаимодействия и электризации. В качестве взаимодействия частиц рассматривалось их соударение, в результате которого скорости и заряды частиц изменяются. Заряд, передаваемый при ударе, зависит от упругих и электрических свойств материала частиц, их размеров и скоростей. Удар рассматривался как абсолютно упругий, трение между частицами не учитывалось. В этой работе соударение частиц рассматривается как неупругий удар с ненулевым коэффициентом восстановления (когда коэффициент восстановления равен 1, удар является абсолютно упругим). Предполагается, что частицы не коагулируют (случай абсолютно неупругого удара). Учитывается трение между частицами и их вращение. Проводится оценка учёта дополнительных факторов взаимодействия частиц на течение смеси.

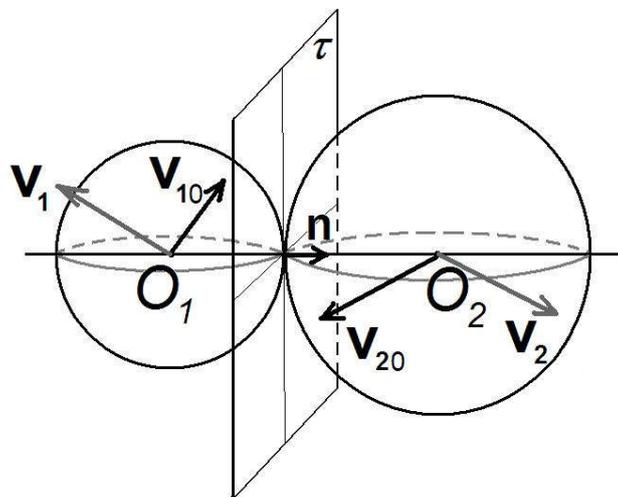


Рис. Схема взаимодействия частиц.

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. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика – Том 7. Теория упругости. М: Наука. 1987.

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

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ НА ТЕЧЕНИЕ СМЕСИ ГАЗ – ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВИДЕ ПЛОСКОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: GorokhovaNV@imec.msu.ru

Моделируется течение смеси газа и заряженных частиц, с учётом их взаимодействия и электризации, в случае плоской стационарной затопленной струи несжимаемой жидкости в предположении, что движение частиц не влияет на течение несущей среды. При описании движения частиц используется подход Лагранжа: частицы движутся под действием силы тяжести, гидродинамических и электростатических сил. При взаимодействии (соударении) частиц меняются их скорости и заряды. Предполагается, что смесь состоит из частиц двух различных диаметров. В начальный момент распределение частиц определяется их количеством (или размерами занимаемой ими области), общей концентрацией и долей крупных частиц. Проводится детальное исследование влияния параметров распределения на течение смеси в виде затопленной струи и эволюцию электрического поля в процессе течения. Определяются количественные характеристики электрического поля (накопленный частицами заряд, максимальная напряжённость электрического поля и другие). Оценивается количество и начальная концентрация частиц, при которых напряжённость поля достигает критических значений самостоятельного разряда или молнии.

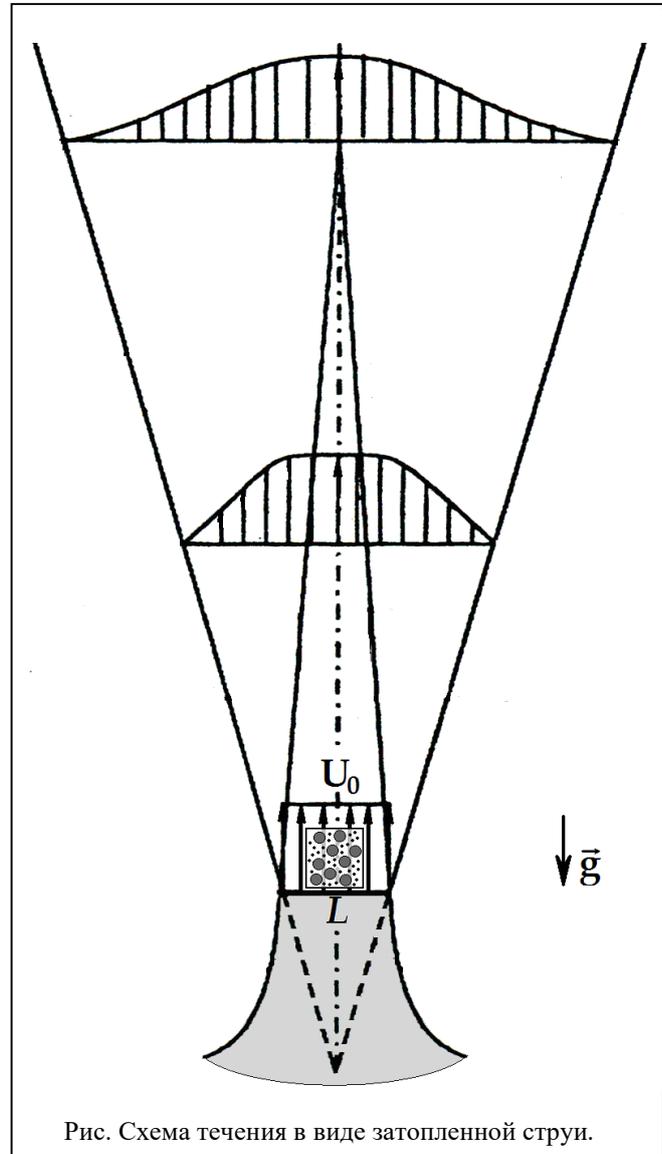


Рис. Схема течения в виде затопленной струи.

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. Vol. 2. Pergamon Press, Oxford. 1971. P. 61-149.

О СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПЕРИФЕРИИ КОЛЕСА

Г.В. Гусак

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

e-mail: g_gusak@mail.ru

В работе рассматривается математическая модель контактного взаимодействия деформируемого колеса с недеформируемой опорной поверхностью.

Используется представление колеса в виде абсолютно твердого диска и деформируемого протектора, образованного множеством радиально расположенных упругих стержней [1-3]. Взаимодействие элемента протектора и дороги описывается в рамках модели сухого трения Кулона. Деформация колеса определяется как совокупность деформаций элементов протектора. Сначала рассматривается дискретная модель с конечным числом стержней, затем осуществляется переход к непрерывной модели протектора. Стержневой протектор служит моделью среды, поглощающей энергию и обуславливающей сопротивление качению.

Границы области контакта, участков сцепления и проскальзывания внутри нее, величины и направления сил реакции считаются заранее неизвестными и определяются в ходе исследования в зависимости от жесткостных и геометрических характеристик протектора, а также сил и момента, приложенных к диску колеса.

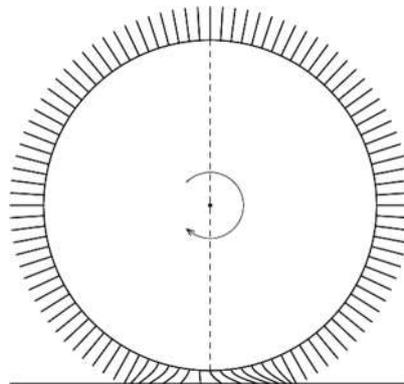


Рис. Модель колеса с деформируемой периферией.

Сначала решается задача о нагружении деформируемого колеса вертикальной силой в двумерной постановке. Описано равновесие нагруженного колеса, найдена зона контакта и условия возникновения внутри нее участков проскальзывания. Вычислены реакции опорной поверхности. Определены потери энергии на цикле последовательной нагрузки-разгрузки колеса.

Далее рассмотрена трехмерная постановка задачи о нагружении деформируемого колеса. Допускается отклонение плоскости колеса от вертикальной, а также смещения деформированных элементов протектора в произвольных направлениях, в том числе выход из плоскости диска колеса. Получены выводы о влиянии углов развала и схождения на распределение сил в области контакта.

Наконец, изучен ряд задач динамики колеса со стержневым протектором в двумерной постановке. Исследовано движение колеса под действием сил и момента, приложенных к центру диска. Выведены уравнения движения деформируемого колеса. В результате исследования проскальзывания в области контакта получен метод определения типа движения (качение без проскальзывания, качение с частичным проскальзыванием, движение юзом). Изучен стационарный режим движения, при котором линейная и угловая скорость колеса остаются постоянными. Определены условия, необходимые для поддержания заданного стационарного режима движения.

1. Вильке В.Г., Гусак Г.В. Об одной модели армированной шины со стержневым протектором // ПММ. 2011. Т.75. Вып.3. С.435-448.

2. Гусак Г.В. Силы реакции при статическом нагружении колесной пары с развалом // Вестн. Моск. ун-та. Сер.1. Математика. Механика. 2018. №4. С.40-47.

3. Гусак Г.В. Гистерезисные потери при нагрузке-разгрузке колеса со стержневым протектором // Вестн. Моск. ун-та. Сер.1. Математика. Механика. 2020. №2. С.28-34.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ФЕРМ

Н. П. Дорофеев, Н. В. Наумова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
e-mail: st067927@student.spbu.ru, n.v.naumova@spbu.ru

Ферма- стержневая система в строительной механике, остающаяся геометрически неизменяемой после замены ее жестких узлов шарнирными, предназначенная для реконструкции зданий и сооружений различного назначения. Также ферменные конструкции – это одна из инновационных технологий, используемая для негерметичного хранения грузов, установки солнечных батарей и радиаторов на Международной космической станции. В данной работе проводился расчет ферм, выполненных из 3 различных материалов: стали, титана и алюминия, аналитическими и численными методами, с последующим сравнением полученных результатов.

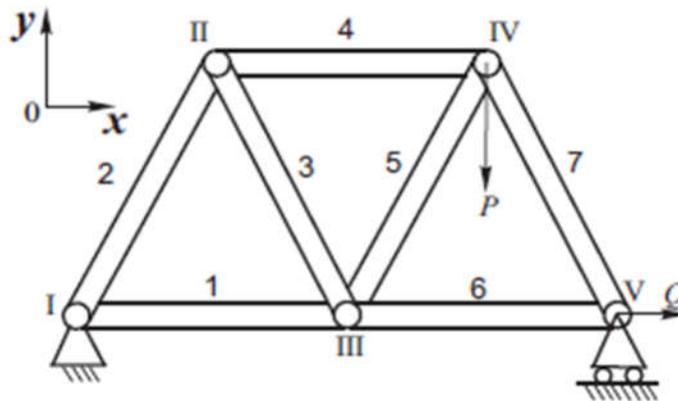


Рис. Пример ферменной конструкции.

Особое внимание уделялось расчету усилий в стержнях фермы и максимальных деформаций элементов, составляющих ферму. Предполагалось, что нагрузка прикладывается только в узлах, а в элементах фермы возникают только усилия растяжения-сжатия.

Для определения усилий в стержнях был использован метод вырезания узлов. Численные расчеты проводились в программном комплексе ANSYS. Сравнение значений усилий и деформаций, полученных аналитическими и численными методами, показывают достаточно хорошее совпадение результатов. Относительная погрешность не превышает 2%. Выяснилось, что наименее деформируемым материалом является сталь, а наиболее подвержен деформации, из представленных материалов – алюминий. Максимальная деформация стержня, изготовленного из алюминия, более чем в 2.5 раза превышает данную величину для стального стержня.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-19-01-00208.

1. Наумова Н.В. Вычисление частот колебаний стержней с разными граничными условиями, Вестник СПбГУ, Сер. 1, Вып. 1, 1998, С. 78– 81

2. Наумова Н.В., Иванов Д.Н. Исследование статических деформаций, колебаний и устойчивости конструкций в пакете ANSYS; учебное пособие. СПб, Издательство СПбГУ. 2007. 65 с.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е.М. Дымнич¹, Е.С. Емельянова^{1,2}, В.А. Романова¹

¹Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

e-mail: dymnich@ispms.tsc.ru

Технологические особенности получения аддитивных материалов приводят к образованию сложной микроструктуры, характеризующейся наличием границ раздела разного типа и геометрии, механической и кристаллографической текстур. Поскольку в рамках макромеханического подхода анализ деформационного поведения аддитивных материалов весьма затруднителен, разумным является использование многоуровневого моделирования с явным учетом микроструктуры материала [1]. В рамках подхода многоуровневого моделирования характеристики, полученные на нижележащих масштабах, использовались в качестве входных данных на более крупном масштабном уровне (рис. 1).

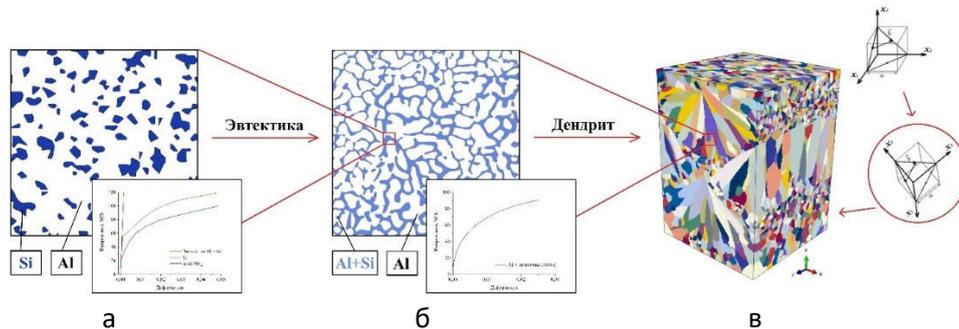


Рис. 1. Модельные структуры аддитивного сплава Al10SiMg на разных масштабных уровнях: эвтектика Al+Si (а), дендритная структура зерна (б), поликристаллическая структура (в).

Согласно литературным данным зерна исследуемого сплава представляют собой дендриты, ветви которых отделены тонкой эвтектической прослойкой. Для определения свойств эвтектики (Al+Si) было проведено двумерное моделирование для фрагментов эвтектики, полученных путем графической обработки экспериментальных изображений (рис. 1а). Осредненные по объему характеристики были заданы в качестве кривой нагружения для эвтектической фазы на масштабе дендритной структуры зерна. На этом масштабе структура представляла собой ячейки дендритов, отделенные каркасной прослойкой эвтектической фазы (рис. 1б). Осредненные на этом масштабе характеристики деформационного отклика были использованы для описания упрочнения зерен трехмерной структуры на мезоуровне (рис. 1в).

Трехмерная модель поликристаллической структуры аддитивного алюминиевого сплава была сгенерирована методом пошагового заполнения. В соответствии с данными EBSD анализа модельный поликристалл содержал два характерных типа зерен – равноосные зерна по границам областей, имитирующих ванны расплава, и радиально направленные вытянутые зерна в их центральных частях (рис. 1в). Для описания деформационного отклика зерен были использованы определяющие соотношения физической теории пластичности для ГЦК кристаллов.

Для модельной трехмерной зеренной структуры в масштабе нескольких ванн расплава, была проведена серия расчетов растяжения вдоль, поперек направления сканирования и в направлении наращивания слоев. Проанализирована эволюция полей напряжений и пластических деформаций на мезоуровне. Показано, что на мезоуровне картины локализации пластической деформации и распределения напряжений коррелируют с областями равноосных и вытянутых зерен. Наибольшее отклонение локальных характеристик напряженно-деформированного состояния от среднего уровня наблюдалось для случаев растяжения вдоль направления сканирования и в направлении роста слоев.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-501-12020 ННИО-а.

1. Micromechanical Model of Deformation-Induced Surface Roughening in Polycrystalline Materials, Phys. Mesomech., 20, No. 3 (2017) 81.

ТЕПЛООБМЕН В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОГО ЛАНДШАФТА

А.В. Евграфова, А.Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь

e-mail: eav@icmm.ru

Стремительный процесс урбанизации приводит к бурному изменению морфологии городской застройки и оказывает негативное влияние на микроклимат в пределах городского ландшафта. Проблема прогнозирования микроклимата на масштабах города на сегодняшний день не решена. Городской микроклимат в первую очередь связан с естественной циркуляцией воздуха, интенсивность которой зависит от геометрии городского пространства и особенностей рельефа местности. Прямое численное моделирование городской среды, даже при помощи современных суперкомпьютеров, не представляется возможным. Создание двумерных моделей бессмысленно, течения в такой системе принципиально трехмерные. Существующие трехмерные модели с более подробной детализацией сильно ограничены по масштабам и требуют больших вычислительных ресурсов [1-2]. При этом результаты трехмерного моделирования согласуются с данными натурных наблюдений только при сравнении средних характеристик. В свою очередь натурные эксперименты дают очень ограниченный набор данных и чаще всего используются только для верификации моделей. Разумной альтернативой используемым подходам может служить лабораторный эксперимент. Однако экспериментальных работ по городской климатологии очень мало [3-4].

Целью данного исследования является лабораторное моделирование процессов теплообмена за счет нагрева поверхности города солнечным излучением. В качестве объекта исследования был использован трехмерный макет части города Пермь, который учитывает сложный рельеф местности, высоту и расположение зданий на территории площадью 5 квадратных километра (макет создан в масштабе 1:4000). Рассмотрено влияние рельефа на величину и пространственное распределение конвективного теплопотока при наличии и отсутствие внешней циркуляции.



Рис. Тепловая карта города. Данные получены при помощи ИК камеры FLIR SC5000 после длительного нагревания поверхности города инфракрасным нагревателем.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (проект № С-26/788)

1. Cybyk B. et al. Simulation of fluid dynamics around complex urban geometries // 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2001. 803
2. Boris, J. The threat of chemical and biological terrorism: preparing a response // Computing in Science & Engineering. 2002. 4(2). 22-32.
3. Kastner-Klein P., Rotach M. W. Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer // Boundary-Layer Meteorology. 2004. 111(1). 55-84.
4. Klein P., Leitl B., Schatzmann M. Driving physical mechanisms of flow and dispersion in urban canopies // International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. 2007. 27(14). 1887-1907.

МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТИТАНЕ

Е.С. Емельянова^{1,2}, В.А Романова²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

e-mail: emelianova@ispms.ru

Большинство конструкционных металлов и сплавов характеризуются поликристаллической структурой. Исследование морфологических изменений, происходящих на свободной поверхности поликристаллических материалов в процессе нагружения, представляет интерес как для инженерных приложений, так и для научно-исследовательских задач. С одной стороны, возникновение деформационного рельефа может рассматриваться как нежелательное явление, поскольку оказывает негативное влияние на характеристики сопротивления усталости, износу и приводит к ухудшению физико-механических характеристик материала за счет локализации пластической деформации. С другой стороны, деформационные процессы на поверхности связаны с эволюцией напряженно-деформированного состояния в объеме материала и историей нагружения, что может послужить основой для разработки методов неразрушающего контроля и остаточного ресурса материала [1].

В настоящей работе предложена микромеханическая модель формирования деформационного рельефа в поликристаллическом титане в процессе одноосного нагружения. Модель деформационного отклика зерен разработана с учетом упруго-пластической анизотропии кристаллов с гексагональной плотноупакованной (гпу) решеткой в рамках физической теории пластичности кристаллов. Исследуется влияние размера зерен и текстуры на формирование и эволюцию деформационного рельефа.

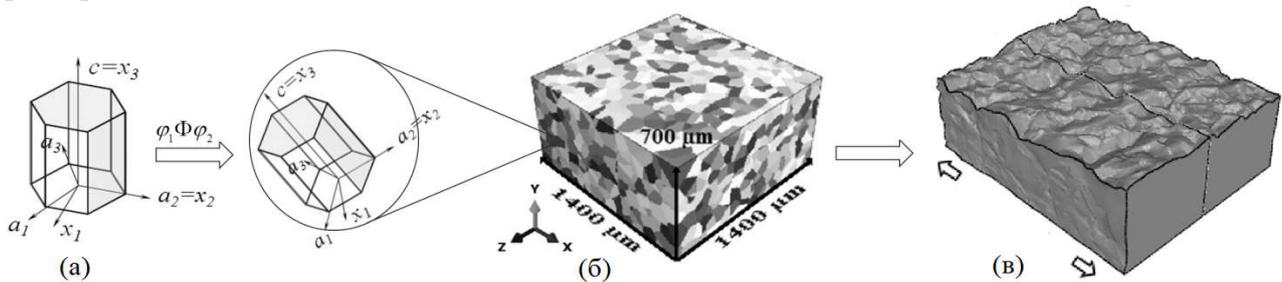


Рис. Схематичное представление гпу кристалла (а), 3D микроструктуры (б) и расчетная картина деформационного рельефа при деформации 20% (в).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00600).

I.V. Romanova, R. Balokhonov, E. Emelianova [et al.] Early prediction of macroscale plastic strain localization in titanium from observation of mesoscale surface roughening // Int. J. Mech. Sci. 2019. 161-162. P. 105047.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Ю.С. Зайко, А.Г. Куликовский

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

e-mail: zayko@imec.msu.ru

Течения потоков жидкости по наклонным поверхностям часто встречаются в природе и различных технических приложениях. С первой четверти XX века устойчивость таких потоков и развитие возмущений в них активно изучались аналитически, экспериментально, а позже и численно (см., например, [1, 2]). В настоящей работе аналитически в линейном приближении с помощью метода перевала изучается асимптотическое поведение локализованного по пространству и времени возмущения слоя линейно-вязкой жидкости на наклонной плоскости. Течение описывается уравнениями в гидравлическом приближении, то есть осреднёнными по глубине уравнениями МСС с учётом некоторых предположений (см., например, [3]). Рассматривается однородный неустойчивый поток на склоне постоянного уклона α (рис. 1а). Ранее эволюция трёхмерного локализованного возмущения открытого потока на вертикальной стенке исследовалась методом перевала в работах [2, 4]. В [2] (Глава 11, с. 327) рассматривалось течение, описываемое обобщённым уравнением Курамото-Сивашинского; в [4] — течение, описываемое системой уравнений Капицы-Шкадова.

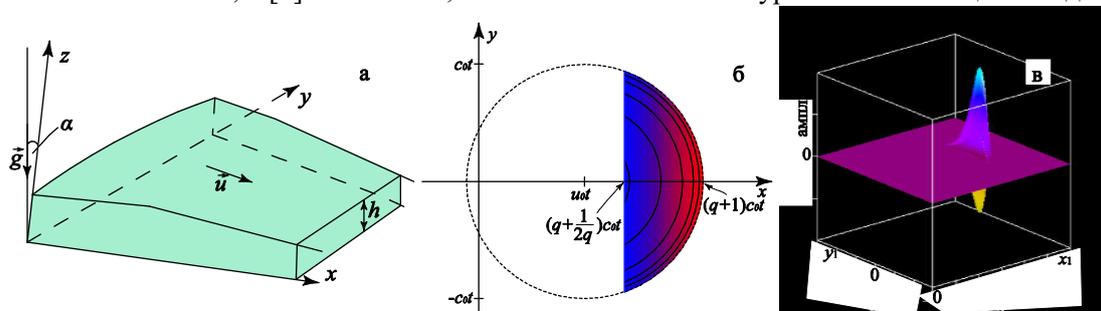


Рис. 1. а — схема течения и система координат; б — цветом показана область, занятая растущим возмущением, синий соответствует наименьшей амплитуде возмущения, красный — наибольшей, серые дуги окружностей — гребни растущих волн; в — визуализация возмущения в пространстве в системе координат x_1y_1 , движущейся со скоростью u_0t .

Локализованное возмущение представляется суммой двойных интегралов Фурье, где интегрирование ведётся по всем вещественным волновым числам k_x, k_y (k_x, k_y — компоненты волнового вектора), суммирование — по корням дисперсионного уравнения (см. [5]). В начальный момент времени возмущение задаётся дельта-функцией. С помощью метода перевала определены размеры и форма области пространства, занятой растущим возмущением (рис. 1б), и поведение волны внутри этой области. (Обозначения: g — ускорение свободного падения, h — глубина потока, $q = u_0/c_0$, $c_0 = (gh_0 \cos \alpha)^{1/2}$, u_0 — скорость невозмущённого потока, направленная вдоль оси x , нижний индекс «0» отмечает величины, относящиеся к невозмущённому течению.) Возмущение растёт внутри сегмента круга радиуса c_0t с центром в точке $x = u_0t, y = 0$. Гребни растущих волн — дуги окружностей с центром в той же точке (показаны серым на рис. 1б). Длина волны стремится к нулю при приближении к точке $x = (q+1)c_0t$. Фазовая скорость возмущения превосходит групповую. Визуализация возмущения в пространстве приведена на рис. 1в.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-30012).

1. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. — Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. — 256 с.

2. Chang H.-C., Demekhin E.A. Complex Wave Dynamics on Thin Films. D. Möbius and R. Miller. Elsevier. Amsterdam. 2002.

3. Эглит М.Э. Неустойчивые движения в руслах и на склонах. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. — 96 с.

4. Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. Three-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. II. A solitons // Phys. Fluids. 2007. V. 19. 114104.

5. Zayko J., Eglit M. Stability of Downslope Flows to Two-Dimensional Perturbations. // Phys. Fluids. 2019. V. 31. 086601.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕВАЛА В ЗАДАЧЕ ОБ АСИМПТОТИКЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА СКЛОНЕ

Ю.С. Зайко

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: zayko@imec.msu.ru

В докладе подробно описывается применение метода перевала к задаче об асимптотическом поведении локализованного возмущения потока ньютоновской среды на склоне постоянного уклона α . Движение жидкости происходит под действием силы тяжести и описывается уравнениями в гидравлическом приближении. Система уравнений имеет аналогию с системой уравнений газовой динамики, следовательно, является гиперболической. Все малые возмущения такой системы лежат внутри конуса характеристик $(x-c_0t)^2+y^2\leq c_0^2t^2$, который выделяет на плоскости U_1, V_1 круг единичного радиуса с центром в точке $(q, 0)$. Здесь $U_1=U/c_0$, $V_1=V/c_0$, $q=u_0/c_0$, $x=Ut$, $y=Vt$, u_0 — модуль скорости невозмущённого течения, $c_0 = (gh\cos\alpha)^{1/2}$ — скорость распространения малых мелкомасштабных возмущений относительно частиц среды, оси x , y лежат в плоскости склона, невозмущённая скорость направлена вдоль оси x . С помощью метода перевала исследуется характер неустойчивости (конвективная или абсолютная неустойчивость) вдоль каждого луча $x=Ut$, $y=Vt$ (U , V вещественные). В рассматриваемой задаче метод перевала применяется сначала в комплексной плоскости k_y , затем в комплексной плоскости k_x (возмущение считается двумерным и задаётся интегралом Фурье по всем вещественным волновым числам). С помощью метода перевала найдена форма области, занятой растущим возмущением. На рис. приведены картины линий уровня функции $\text{Im}(\omega(k_x, k_y))=\text{const}$ в комплексных плоскостях волновых чисел k_x , k_y , показаны деформированные контуры интегрирования, проходящие через перевальные точки функции $\omega(k_x, k_y)$ (здесь ω — комплексная частота).

Работа частично поддержана грантами РФФИ (проекты № 18-31-20057, № 18-29-10020).

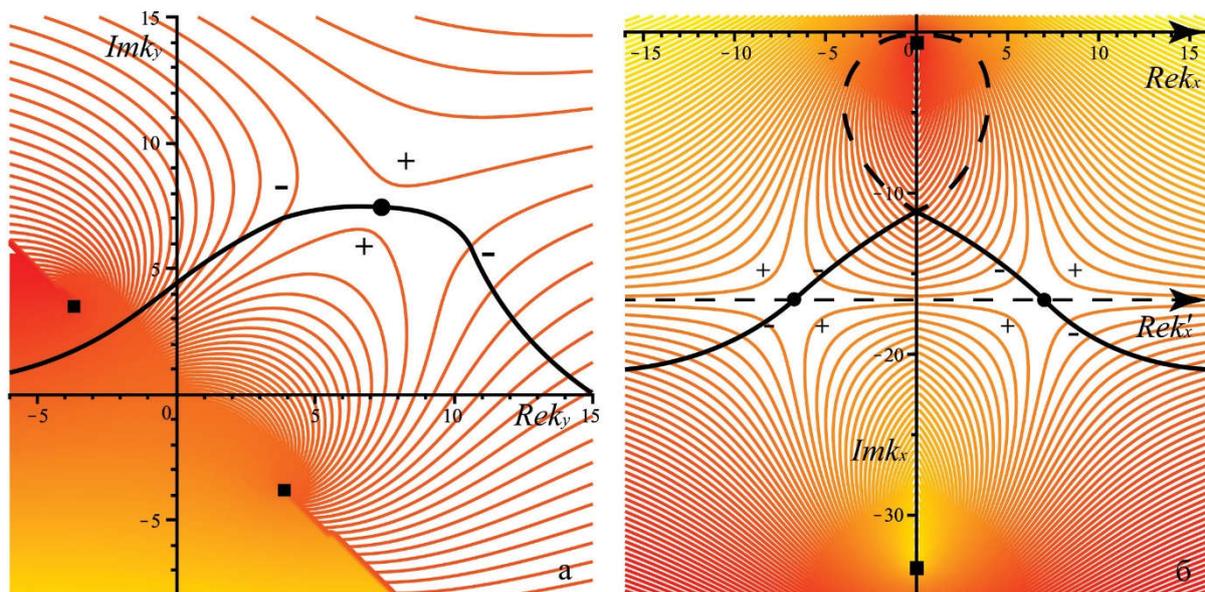


Рис. Линии уровня функции $\text{Im}(\omega(k_x, k_y))=\text{const}$ в комплексной плоскости (а) k_y , (б) k_x . Жирными чёрными линиями показаны деформированные контуры интегрирования, проходящие через точки перевала (кружки) функции $\omega(k_x, k_y)$; квадратами показаны точки ветвления этой функции.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНОГО УСТРОЙСТВА, ФОРМИРУЮЩЕГО ДЛИННУЮ ЛАМИНАРНУЮ СТРУЮ, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЧИСТОЙ ЗОНЫ

Ю.С. Зайко¹, А.И. Решмин¹, С.Х. Тепловодский¹, Л.А. Гавирова², В.Д. Салова²

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

²Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: zayko@imec.msu.ru

В работе [1] описано разработанное в НИИ механики МГУ устройство, позволяющее формировать длинную (длиной $\sim 5D$) ламинарную струю диаметром $D = 0.12$ м при числах Рейнольдса около 10 000. Особенность устройства состоит в том, что его длина составляет всего $1.5D$. Для формирования струи диаметра ~ 0.1 м стандартным способом понадобилась бы труба длиной десятки метров (в ней на выходе формируется параболический профиль скорости, благодаря которому затопленная струя остаётся ламинарной на расстоянии нескольких диаметров от выхода из трубы) [3]. Полученная в работе [1] струя позволила экспериментально верифицировать предсказания линейной теории устойчивости в применении к затопленной струе круглого поперечного сечения [2], что является вкладом в развитие фундаментальной теории устойчивости.

Кроме этого, разработанный способ создания длинных ламинарных струй имеет непосредственное прикладное значение. Если сформировать струю достаточно большого диаметра, состоящую из очищенного воздуха, то она может быть использована в качестве локальной чистой зоны. Такие зоны необходимы в ряде областей высокоточной промышленности, медицине, биологических и химических лабораториях. Если зона создаётся с помощью ламинарной струи, она не должна быть отгорожена непроницаемыми стенками, отсутствие которых упростит доступ персонала к защищаемому объекту и облегчит работу с ним. В докладе рассказывается об установке, создающей локальную чистую зону диаметром 0.5 м и длиной 0.8 м. Кроме измерений механических характеристик струи, совместно с лабораторией физиологии и биохимии микробов биологического факультета МГУ проведены микробиологические эксперименты, результаты которых подтверждают, что струя очищенного воздуха не смешивается с окружающим воздухом, специально загрязнённым микроорганизмом *Bacillus subtilis* в спорном состоянии, и остаётся ламинарной на расстоянии до 0.8 м (см. рис. 1(а – в)).

Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект № 18-08-00074).



Рис. 1. На чашах, стоявших на расстоянии $L = 0.8$ м от диффузора при проведении эксперимента по загрязнению окружающего воздуха, не обнаружено колониеобразующих единиц (КОЕ) (а); на чашах, стоявших на расстоянии $L = 1.2$ м, выявлено 3.48 КОЕ/см² (б); на контрольной чаше, стоявшей вдали от струи очищенного воздуха, выявлено 28 КОЕ/см² (в).

1. Zayko J., Teplovodskii S., Chicherina A., Vedeneev V., Reshmin A. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers. *Phys. Fluids*. 2018. V. 30. 043603.

2. Zayko J., Reshmin A., Trifonov V., Gareev L., Vedeneev V. Experimental study of perturbation growth in the submerged jet. *EDRFSM 2019*. March 26–29 2019, Bad Herrenalb, Germany.

3. Козлов Г.В., Грек Г.Р., Сорокин А.М., Литвиненко Ю.А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи. *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15. № 1. С. 59 – 73.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА МЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕЛ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ 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 представленной работе рассматривается одномерная полярно-симметричная связанная задача, целью которой является исследование НДС (напряженно-деформированного состояния) сплошного ортотропного многокомпонентного однородного бесконечного цилиндра, находящегося под действием равномерно распределенных нестационарных поверхностных возмущений упругодиффузионного характера. В работе учтено время релаксации диффузионных потоков в выбранном теле, что является существенным при моделировании быстропротекающих нестационарных процессов.

Математическая постановка задачи включает в себя дифференциальное уравнение движения сплошной среды и N неоднородных дифференциальных уравнений массопереноса [1-5]. Замыкают математическую постановку задачи краевые условия, задаваемые на всей поверхности цилиндра. Начальные условия принимаются равными нулю.

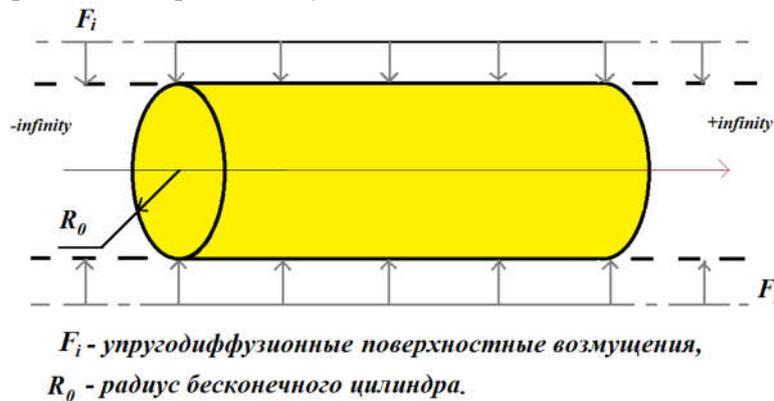


Рис. Иллюстрация к постановке задачи.

Решение задачи в интегральной форме представляет собой свертки функций влияния данной задачи с функциями, задаваемыми в правых частях граничных условий. Для нахождения функций Грина используются разложение искомых в задаче функций в ряды Бесселя, а также интегральное преобразование Лапласа по времени [3-5]. Оригиналы функций влияния определяются с помощью вычетов и таблиц операционного исчисления.

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., Тарлаковский Д.В. Полярно-симметричная стационарная задача механоидиффузии для изотропного полого цилиндра // Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТР-принт», 2017. с. 128-132

4. Зверев Н.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Сплошной ортотропный цилиндр под действием поверхностных полярно-симметричных стационарных возмущений // Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТР-принт», 2017. с. 132-137

5. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Полярно-симметричная задача упругой диффузии для многокомпонентной среды // Проблемы прочности и пластичности. 2018. № 80 (1). с. 5-14.

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

А.Г. Здитовец, А.И. Леонтьев, Ю.А. Виноградов, Н.А. Киселёв, С.С. Попович
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: zditovets@mail.ru

Под термином «энергоразделение» понимается перераспределение полной энтальпии (температуры торможения) в потоке газа без совершения им внешней работы и теплообмена с окружающей средой. Количественной мерой температурного разделения потоков служит разность между полными среднemasсовыми температурами газового потока на входе и на «горячем» и «холодном» выходах из устройства.

В НИИ механики МГУ на протяжении нескольких лет проводятся исследования метода энергоразделения, предложенного в работе [1]. Он основан на эффекте энергоразделения в пограничном слое высокоскоростного газового потока, обтекающего адиабатную поверхность. Известно, что чем выше число Маха (M) потока и чем больше число Прандтля (Pr) отличается от единицы, тем больше температура торможения пристенных слоев (температура адиабатной стенки) отличается от начальной температуры торможения потока. Альтернативным способом увеличения данной разности температур является использование эффекта осаждения сконденсировавшейся фазы на обтекаемой поверхности.

Цель работы – исследование влияния конденсации водяных паров из высокоскоростного потока влажного воздуха на температуру обтекаемой адиабатной стенки. Проведено три серии экспериментальных исследований при одинаковом начальном давлении смеси. В каждой серии начальная температура влажного воздуха постоянна. При этом начальная относительная влажность воздуха изменялась от 5% до 90% за счет изменения массовой доли перегретого водяного пара в смеси при постоянной температуре и давлении. Изменение начальной температуры от серии к серии позволяло существенно увеличить начальное влагосодержание при одинаковых значениях относительной влажности. В результате зафиксировано, что с ростом начального влагосодержания область конденсации (скачок конденсации) паров воды смещалась в сторону меньших чисел Маха, при этом температура обтекаемой поверхности росла. При определенном значении влагосодержания область конденсации водяных паров перемещалась в область канала, в которой поток двигался с дозвуковой скоростью. При этом температура обтекаемой поверхности снижалась до значений меньших, чем для случая обтекания «сухим» воздухом.

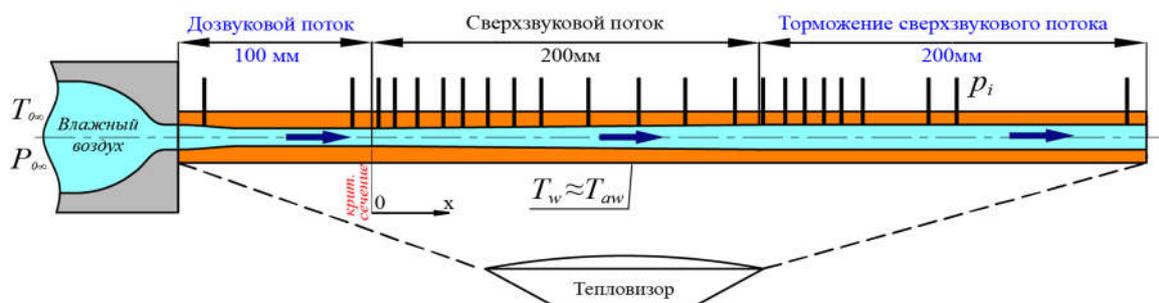


Рис. Схема установки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-19-00234

1. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии наук. 1997. Vol. 354, № 4. P. 475–477.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ АППАРАТОМ

В.К. Зимичев, А.И. Кобрин
НИУ «МЭИ», Москва
e-mail: valerii.zimichev@gmail.com

Собран и испытывается двуногий шагающий аппарат – робот, управляемый сервоприводами с нейросетевым регулятором [1]. Рассматривается движение системы по горизонтальной плоскости. Обратная связь обеспечивается при помощи гироскопа и акселерометра. Нейронная сеть производит решение и позволяет оптимизировать прямую и обратную задачи управления.

Механическая система двуногого шагающего аппарата состоит из 6 суставов: бедренных, коленных и суставов ступней, и, таким образом, имеет 6 степеней свободы. Схема конструкции ног аппарата представлена на рис.1. Система полностью автономна, все программные вычисления и питание являются носимыми.

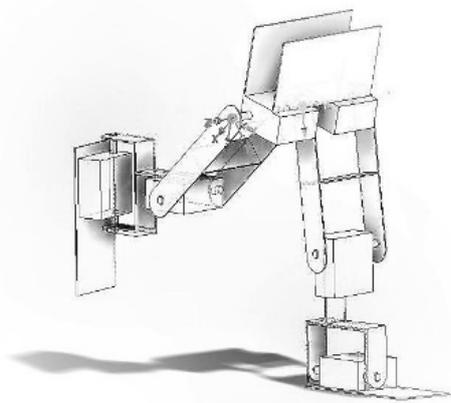


Рис.1.Схема конструкции ног шагающего аппарата.

Вычислительная часть управления делится на высокоуровневую и низкоуровневую. Низкий уровень обеспечен управляющей платой Arduino Uno. К ней непосредственно подсоединены исполняющие сервоприводы, а также датчики – акселерометр ADXL345 и микромеханический гироскоп BM160. Плата обеспечивает сбор и передачу данных на высокий уровень. Также на роботе имеется носимый портативный одноплатный компьютер Raspberry Pi3. На нём, средствами языка Python реализован алгоритм самообучения.

Алгоритм, исполняя заданную или сгенерированную предыдущим запуском последовательность действий сервоприводов, записывает обучающий образец реальных показаний датчиков. Параллельно, алгоритм обучения запускает прямое прохождение нейронной сети, а затем реализацию метода обратного распространения ошибки, основанный на сравнении полученных данных и

предсказаний нейронной сети. Используются метод градиентного спуска и несколько видов регуляризации весов. Авторами разрабатывается применение нового вида регуляризации использующего немарковское затухание.

Обучение проходит в направлениях решения прямой и обратной задачи механики. Нейронная сеть, методами автоматической оптимизации, связывает исполняемую последовательность действий и последствия её исполнения. Таким образом, решение прямой задачи определяет программу действий, а решение обратной задачи даёт алгоритм, ведущий к желаемым результатам.

В работе разрабатывается архитектура управления нейронной сетью, позволяющая применить двунаправленный обучающий алгоритм настройки параметров нейронов во время ходьбы в режиме реального времени. Преимуществами создаваемой системы управления являются, адаптивность к переменным параметрам подстилающей поверхности и кросс-платформенность.

1. В.К. Зимичев, А.И. Кобрин Нейроуправление адаптируемой динамикой шагающего робота // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать шестая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12–13 марта 2020 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2020. С. 997.

ПРИМЕРЫ АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ

А.А. Зобова

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

e-mail: alexandra.zobova@math.msu.ru

В докладе рассматриваются новые примеры применения метода асимптотического разделения движений для исследования динамики систем твердых тел. В каждой задаче естественным образом возникает малый параметр, при нулевом значении которого уравнения допускают один или несколько первых интегралов. При возмущении системы значения этих интегралов медленно меняются с течением времени, что позволяет производить качественный анализ решений полной системы.

В задаче о движении экипажа повышенной маневренности с омниколесами выявляется связь между динамической системой, описывающей его движения по инерции [1], и классической задачей неголономной механики о коньке Чаплыгина. Исследуется механизм потери устойчивости прямолинейных движений такого экипажа (по результатам курсовой работы студента механико-математического факультета Я.Э. Минькова).

В задаче о торможении однородного упругого деформируемого цилиндра по полупространству из того же материала [2] рассматривается два варианта возмущений: однородный цилиндра из вязкоупругого материала [3] и неоднородный упругий цилиндр (по результатам курсовой работы студентки механико-математического факультета А.Н. Зотовой). В каждой из представленных задач методом введения быстрых и медленных переменных удастся выявить качественные свойства решений возмущенных задач.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-01-00140.

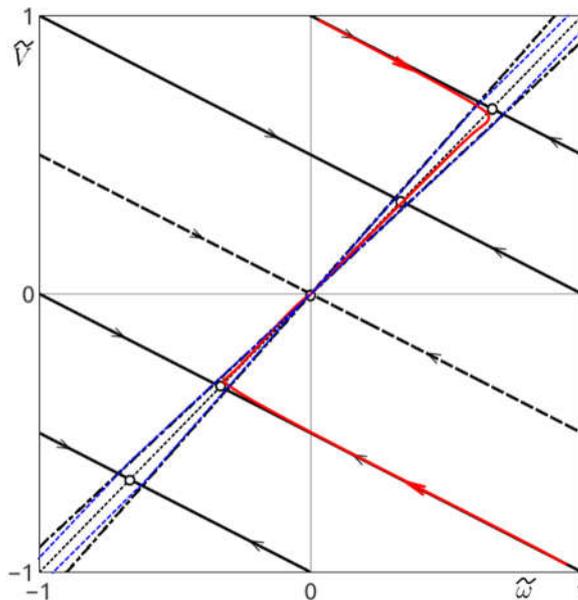


Рис. 1. Возмущение фазового портрета при торможении вязкоупругого цилиндра, катящегося со скольжением по полупространству из того же материала.

1. Зобова А. А., Татаринев Я. В. Свободные и управляемые движения некоторой модели экипажа с роликонесущими колесами // Вестник московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2008. № 6. С. 62–65.

2. Горячева И. Г., Зобова А. А. Динамика упругого цилиндра на упругом основании // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83, № 1. С. 39–46.

3. Zobova A. A., Goryacheva I. G. Dynamics of a viscoelastic cylinder on a viscoelastic half-space // Acta Mechanica. 2020. Vol. 231, no. 6. P. 2217–2230.

КОЛЕБАНИЯ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА В РЕЗОНАНСНЫХ УСЛОВИЯХ ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

О.О. Иванов, А.Б. Подопросветова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: ivanov@imec.msu.ru

Колебания, возникающие в поперечном потоке жидкости или газа за плохо обтекаемыми телами из-за периодического срыва вихрей могут приводить к неприятным условиям эксплуатации различных конструкций, вплоть до их разрушения, но в то же время эти резонансные колебания можно использовать в малых устройствах, преобразующих энергию движения среды в электроэнергию, поэтому изучение этого явления имеет большую практическую значимость.

В данном исследовании рассматривается обтекание упругого цилиндра – резинового круглого шнура диаметром $D = 6$ мм, установленного в рабочей части аэродинамической трубы с поперечным сечением 500×300 мм. Характерные резонансные скорости находятся в диапазоне $0.4\text{--}0.6$ м/с.

В предварительных экспериментах с одиночным цилиндром получена максимальная относительная амплитуда колебаний $A/D \sim 0.29$ и качественное сходство с другими экспериментами [1], проведенными преимущественно на упруго подвешенных цилиндрах. Визуализация показала небольшую модификацию вихревой дорожки из-за осцилляции шнура. Следующие серии экспериментов проводились при поперечном относительно скорости потока расположении упругого шнура и: а) жесткого цилиндра такого же диаметра; б) жесткой пластины, сонаправленной с потоком. Влияние зазора G между упругим шнуром и вторым объектом на амплитуду показано на рисунке. Для тандема цилиндров найдено, что при зазоре, меньшем половины, колебания отсутствуют, а для $1\text{--}1.5$ диаметров существует плато, где амплитуда колебаний приблизительно одинакова, затем оно резко переходит в зону отсутствия взаимного влияния цилиндров друг на друга.

В случае расположения цилиндра рядом с пластиной последняя имела длину 35 мм, толщину 2 мм, а концы скруглены по эллипсу с полуосями 3 и 1 мм. Было найдено, что амплитуда колебаний уменьшается при расположении цилиндра «над» пластиной (Рис., $S < 0$). В непосредственной близости от задней кромки цилиндра и далее по потоку ($S > 0$) обнаружены зоны усиления колебаний амплитуды вплоть до 40% по сравнению с одиночным цилиндром. На дымовых визуализациях видно, что присутствие цилиндра у задней кромки пластины приводит к более скорому развитию неустойчивости следа пластины, который разрушается в вихри, напоминающие вихри Кельвина-Гельмгольца. Скорее всего, присутствие этих вихрей, сходящих с частотой парных вихрей кармановского типа, воздействуют на цилиндр в фазе движения и усиливая колебания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-20057.

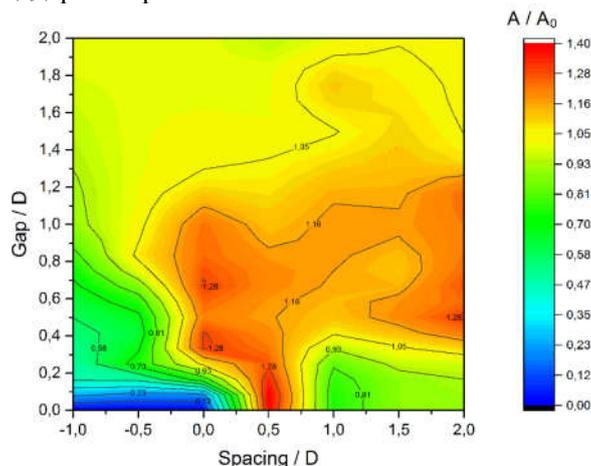


Рис. Усиление амплитуды колебаний цилиндра у задней кромки пластины по сравнению с амплитудой одиночного цилиндра. Gap – зазор между поверхностями цилиндра и пластины, $Spacing$ – смещение центра цилиндра по потоку относительно задней кромки пластины. Направление потока – слева направо, поверхность пластины соответствует $Gap=0$.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

О.О. Иванов, А.Б. Подопросветова
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: ivanov@imec.msu.ru

При обтекании цилиндрических тел, находящихся в воздухе или в воде, нередко возникают колебания, обусловленные сходом вихрей с тела с частотой, близкой к собственной. Хорошо изученное поведение для одиночного цилиндра изменяется, если он рядом с ним находятся какие-либо еще тела, например, множество цилиндров такого же диаметра. Для того, чтобы приступить к исследованию взаимодействия жидкости с такими упругими конструкциями, естественно задаться более простой системой из одного и затем двух тел.

В данном исследовании предварительно рассмотрено обтекание упругого цилиндра – резинового круглого шнура диаметром $D = 6$ мм, установленного в рабочей части аэродинамической трубы с поперечным сечением 500×300 мм. Характерные резонансные скорости находятся в диапазоне $0.4–0.6$ м/с. В предварительных экспериментах с одиночным цилиндром получена максимальная относительная амплитуда колебаний $A/D \sim 0.26$ и качественное сходство с другими экспериментами [1], проведенными преимущественно на упруго подвешенных цилиндрах.

Следующие серии экспериментов проводились при поперечном относительно скорости потока расположении упругого шнура и жесткого цилиндра такого же диаметра (далее такая схема называется «поперечным» тандемом). Влияние зазора G между упругим шнуром и вторым объектом на амплитуду показано на рисунке. Для тандема цилиндров найдено, что при зазоре, меньшем половины, колебания отсутствуют, что, например, отлично от поведения цилиндра вблизи плоскости, а для $1–1.5$ диаметров существует плато, где амплитуда колебаний приблизительно одинакова, затем оно резко переходит в зону отсутствия взаимного влияния цилиндров друг на друга.

Картины визуализации показывают, что существует определенный диапазон зазоров, в котором обтекание двух неподвижных цилиндров происходит, как единого целого, но в то же время переход на резонансные скорости приводит к колебанию упругого цилиндра и обтеканию двух цилиндров с отчетливо различимыми дорожками Кармана.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-31-20057.

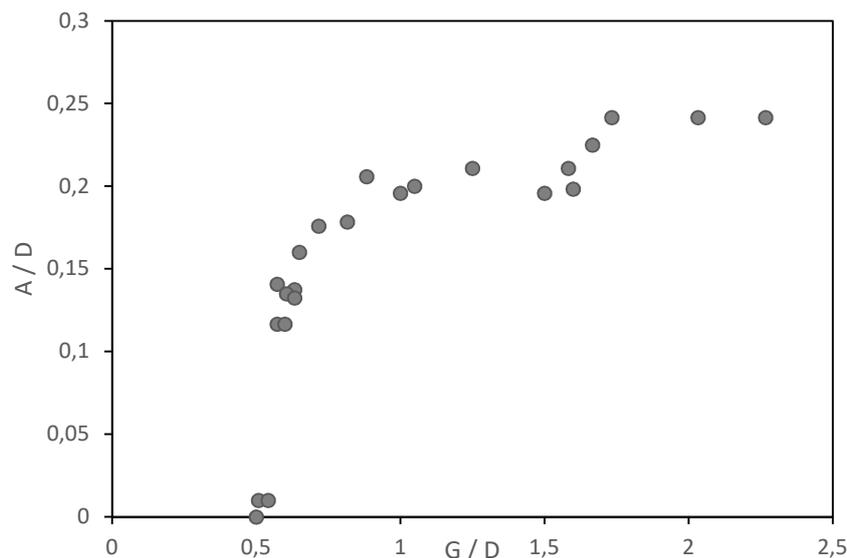


Рис. Зависимость амплитуды колебаний упругого цилиндра от размера зазора в «поперечном» тандеме.

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ

А.А. Адамов¹, А.А. Каменских², А.П. Панькова²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Ранее в [1] был отмечен ряд актуальных задач, связанных с геометрической конфигурацией опорных частей мостов. В работе рассмотрена задача анализа влияния толщины антифрикционного слоя на деформационное поведение конструкции сферической опорной части (рис. 1).

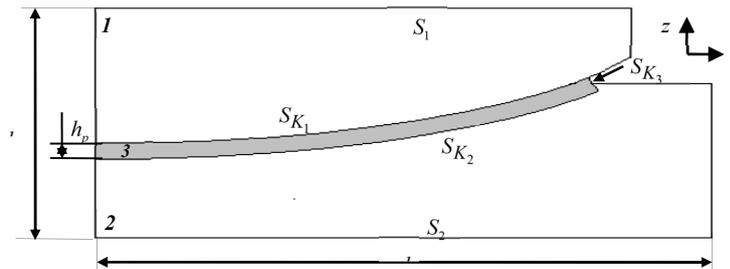


Рис. 1. Расчетная схема сферической опорной части.

Характерные размеры сферической опорной части: максимальные высота $h = 4,83 \cdot 10^{-2}$ м и ширина $b_k = 2b = 2 \cdot 0,0775 = 0,155$ м конструкции, толщина антифрикционной прослойки 3 $h_p = 4,0 \div 8,0 \cdot 10^{-3}$ м. В качестве материалов антифрикционной прослойки рассмотрено 6 материалов: три сверхвысокомолекулярных полиэтилена (СВМПЭ) разных производителей (мат. 1-3); два антифрикционных композиционных материала (мат. 4-5); модифицированный фторопласт (мат. 6).

В рамках серии численных экспериментов получены зависимости распределения контактных параметров, интенсивности напряжения, интенсивности пластических деформаций и нормальных перемещений относительно свободного края слоя скольжения от толщины антифрикционной прослойки. На рис. 2 для примера представлены u_n для $h_p = 4,0$ мм и $\max u_n$ для разных h_p .

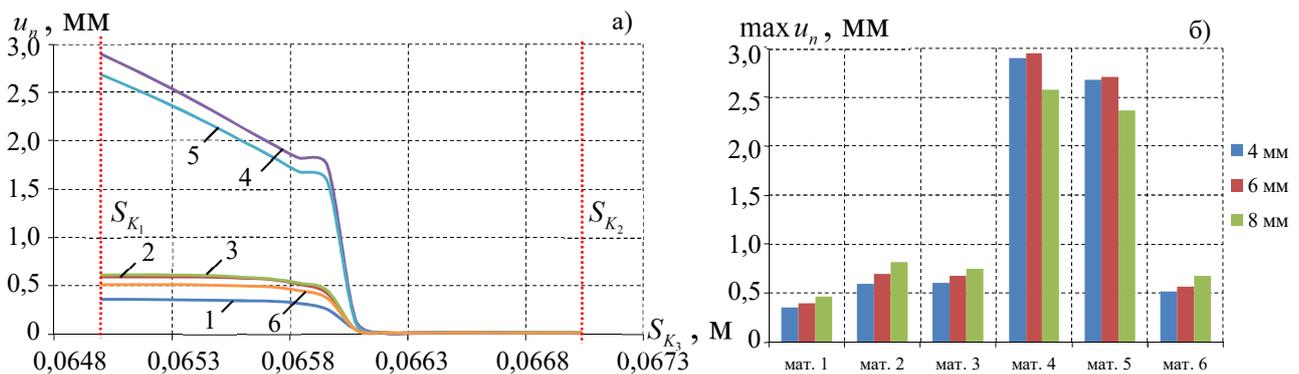


Рис. 2. Перемещения на S_{K_3} : а) толщина прослойки 4 мм; б) $\max u_n$; 1-6 – материалы 1-6 соответственно.

Установлено, что композиционные антифрикционные материалы больше подвержены деформированию. Данный эффект можно наблюдать на рис. 2: перемещения относительно свободного края прослойки из материалов 4-5 значительно больше и достигают 2,894 мм и 2,68 мм соответственно при толщине прослойки 4 мм, что в среднем в 5,6 раз больше, чем у других рассматриваемых материалов слоя скольжения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00147).

1. Adamov A.A., Kamenskikh A.A. The deformation behavior of modern anti-friction polymer materials in the elements of transport and logistics systems with frictional contact // Advances in Intelligent Systems and Computing book series: Digital Science. 2020. Vol. 1114. pp. 522-532.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЗУБНЫХ ШИН С ПРОСЛОЙКАМИ РАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

А.А. Каменских, А.Д. Пушкарева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

На сегодняшний день, одним из самых эффективных способов избежать травмы зубов во время тренировок, соревнований, физического или психоэмоционального напряжения является использование индивидуальных средств защиты в виде протетических конструкций [1]. В связи с этим определенной актуальностью обладает и компьютерное моделирование биомеханического поведения, как конструкций, так и материалов из которых они изготовлены.

В работе рассмотрены задачи, связанные с влиянием геометрической конфигурации прослоек из А-силикона в протетических конструкциях из Ева (рис. 1). Задача реализовывалась в два этапа: 1 – исследование влияние геометрии и толщины прослойки на модельных задачах с канонической геометрией пары зубов (рис. 1 а, б); 2 – анализ влияние геометрии и толщины прослойки на деформационное поведение биомеханического узла с геометрической конфигурацией пары зубов и капши для одного клинического случая (рис. 1 в, г).

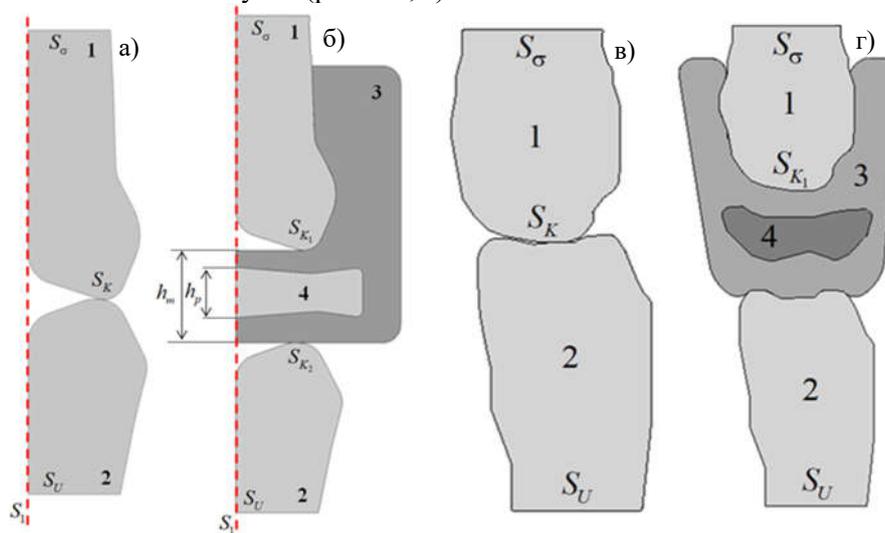


Рис. 1. Расчетные схемы контакта пары зубов через протетические конструкции: а), б) – модельная задача; в), г) – один клинический случай.

В рамках анализа решения модельных задач установлено, что: в среднем максимальная интенсивность напряжения зуба верхнего зубного ряда при контакте через капу снизилась в 11-15 раз меньше; для зуба из нижнего зубного ряда – в 11-19 раз; наибольшее снижение уровня интенсивности напряжений наблюдается при толщине капши 2 мм, так как при контактном деформировании объем основного материала капши в зоне смыкания зубов максимален и подстраивается под геометрию зубной пары при пластическом течении материала; при увеличении толщины прослойки снижение уровня напряжений меньше, чем у капши с прослойкой 2 мм, на 3 и 10 % при толщинах прослойки 3 и 4 мм соответственно.

В рамках анализа деформирования трехслойной капши разной геометрической конфигурации парой зубов для одного клинического случая установлено, что: интенсивность напряжений в твердых тканях зубов в среднем снизилась на 80% при использовании трехслойных капш разной геометрической конфигурации; геометрия прослойки влияет на характер деформационного поведения; использование прослойки с переменной толщиной показало наибольшее снижения уровня интенсивности напряжений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края и РФФИ (проект № 17-48-590411 p_a).

1. Avdeeva E.S., Kamenskikh A.A. The influence of the three-layer mouthguard on the stress-strain state of a pair of opposing teeth // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 731. Art. 012009.

О ДЕФОРМАЦИОННОМ ПОВЕДЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Существует большой набор полимерных материалов и композитов на их основе российского и зарубежного производства, пригодных к использованию в качестве антифрикционных покрытий и прослоек в узлах конструкций, работающих в рамках контактного взаимодействия с трением [1]. Экспериментальное исследование свойств таких материалов и построение численных моделей их поведения в рамках механики контактного взаимодействия являются актуальными направлениями исследования.

В рамках работы выполнено междисциплинарное исследование деформационного поведения ряда современных антифрикционных полимерных материалов и композитов на их основе:

1. Серия натурных экспериментов по определению физико-механических, фрикционных и реологических свойств материалов с идентификацией модели их поведения.

2. Анализ влияния свойств современных антифрикционных полимерных материалов в рамках численных моделей экспериментов на стесненное и свободное сжатие цилиндрических образцов диаметром и высотой 20 мм плитами пресса.

3. Численное моделирование деформационного поведения исследуемых материалов в реальных конструкциях.

При численном моделировании напряженно-деформированного состояния тестовых задач и реальных конструкций было исследовано 6 полимеров и композитов на их основе (материалы 1-6). В качестве первого приближения, для описания модели поведения материалов выбрана деформационная теория упругопластичности (рис. 1).

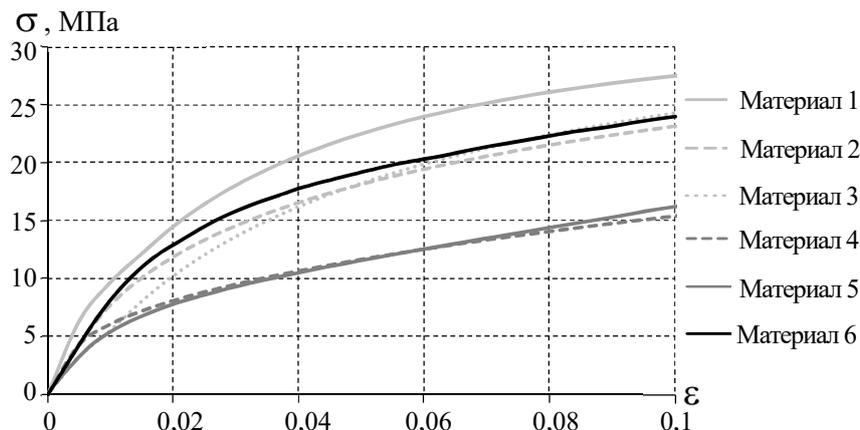


Рис. 1. Диаграммы сжатия $\sigma - \epsilon$.

Установлено, что наилучшими деформационными характеристиками обладает СВМПЭ наполненный углеродом (материал 1), но для построения и идентификации качественной модели его поведения нужны дополнительные экспериментальные исследования с различными историями длительного многоступенчатого нагружения; композиционные материалы на основе фторопласта 4 (материалы 4-5) обладают при стесненном и свободном сжатии более значимыми нелинейными и вязкоупругими эффектами, а также большей податливостью по сравнению с другими исследуемыми материалами, при дендритной форме частиц более заметны реологические эффекты.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№18-08-00903).

1. Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 4. С. 43-56.

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОГО ОБРАЗЦА СПЛАВА TiNi, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ WAAM

У.П. Карасева¹, Р.М. Бикбаев¹, Н.Н. Реснина¹, С.П. Беляев¹, I.A.Palani², S.S. ManiPrabhu², M. Manikandan², S. Jayachandran²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²Indian Institute of Technology Indore, Indor, India

e-mail: uliafoncattel@gmail.com

Среди методов послойного синтеза можно выделить метод послойной электродуговой наплавки (wire arc additive manufacturing - WAAM). Существует лишь несколько работ, в которых сплавы с эффектом памяти формы на основе TiNi получали методом послойной наплавки (WAAM). Основное внимание в этих работах было направлено на исследование структуры таких образцов. Оказалось, что образцы сплава TiNi, полученные методом WAAM характеризуются неоднородным распределением никеля по высоте наплавленных слоев, что влияет на температуры мартенситных переходов и, как результат, ухудшает их функциональные свойства. Поэтому целью настоящей работы явилось исследование влияния отжига на мартенситные превращения в образцах сплава TiNi, синтезированных методом WAAM и их механические свойства.

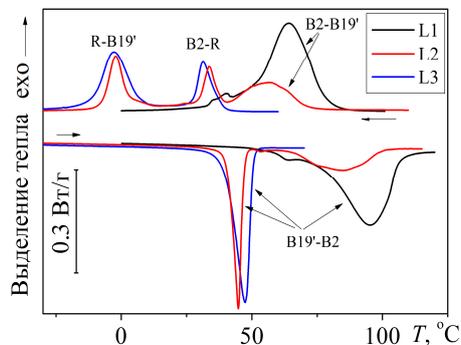


Рис.1. Калориметрические кривые, полученные в различных слоях образца сплава TiNi, синтезированного методом WAAM и отожженного при температуре 450 °C 10 часов.

На рис. 2 представлена диаграмма деформирования трехслойного образца, синтезированного методом WAAM и отожженного при 450 °C 10 часов. Сжатие образца проводили при комнатной температуре, при которой три слоя находились в разном структурном состоянии, что повлияло на зависимость $\sigma(\epsilon)$, на которой видны несколько стадий. Первый участок до 100 МПа может быть связан с переориентацией R фазы. Второй участок при $100 \leq \sigma \leq 200$ МПа может быть обусловлен $R \rightarrow B19'$ переходом в верхних слоях и переориентацией $B19'$ фазы в нижнем слое. На третьем участке при $\sigma > 200$ МПа, ориентированный мартенсит деформируется упруго до $\sigma \sim 500 - 550$ МПа, при котором начинается пластическая деформация. Разрушения образца до напряжения 600 МПа не наблюдали.

Работа выполнена в рамках совместного проекта РФФИ (№ 19-49-02014)-DST (№ DST/INT/RUS/RSF/P-36).

Полученные результаты показали, что отжижки при температурах 450 – 600 °C выравнивают концентрацию никеля только в пределах слоя и понижают концентрацию никеля в верхнем слое, в котором до отжига концентрация никеля была самой высокой. Это существенно уменьшает температурные интервалы, в которых наблюдаются мартенситные превращения. Так, в исходном образце мартенситные превращения при охлаждении не заканчивались даже при температуре -100 °C, а после отжига уже при температуре -20 °C весь образец находится в мартенситной фазе (рис. 1). Кроме этого, выделение частиц Ti_3Ni_4 в верхних слоях приводит к тому, что, во-первых, образование моноклинного $B19'$ мартенсита при охлаждении происходит через образование ромбоэдрической R фазы и, во-вторых, сплав упрочняется.

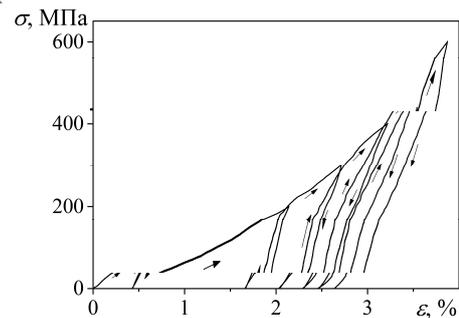


Рис. 2. Диаграмма деформирования, полученная при сжатии образца сплава TiNi, синтезированного методом WAAM и отожженного при 450 °C 10 часов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕЖДУ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНОЙ И НЕПОДВИЖНЫМ ЭКРАНОМ НА СТЕНДЕ ПРЯМОГО ДВИЖЕНИЯ

А.Б. Айрапетов, А.В. Катунин, В.В. Стрекалов

Научно-исследовательский московский комплекс «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», Москва
e-mail: katunin_a_v@rambler.ru

В целях верификации визуализационно-видеографической системы (ВВИС), реализованной в виде макета мобильной измерительной системы (МИС) проведена серия экспериментов на установке прямого движения - скоростном гидростенде ЦАГИ (ГСС, г. Дубна. Исследовалось движение тонкой плоской пластины (ТПП) размером 1470x1000x10 мм, установленной на подвижной каретке, с различными скоростями $V=3\div 6$ м/с в режиме штатного движения и с малой скоростью $V=0.15$ м/с в режиме возвратного хода каретки. Движение осуществлялось в присутствии неподвижного плоского экрана размером 2400x900x20 мм, располагаемого на различных высотах h под движущейся пластиной в диапазоне $h=0.01\div \infty$. Система крепления экрана внутри канала ГСС позволяла изменять h непрерывно. Ниже на рисунке для иллюстрации приведена фотография экспериментальной установки.

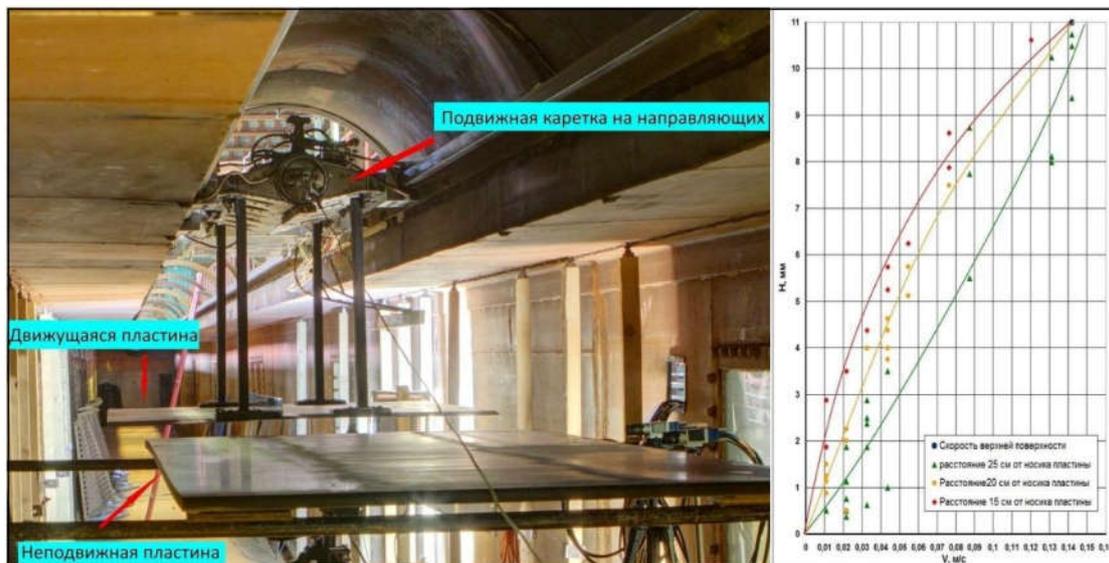


Рис. Исследуемая тонкая пластина на каретке с неподвижным экраном внутри ГСС и полученные результаты для разных высот.

Поле скорости в щели между ТПП и экраном измерялось по авторской методике ВВИС. Результаты измерения профилей продольной скорости в щели для различных расстояний от передней кромки ТПП сравнивались с точными классическими аналитическими решениями разгонного течения Куэтта в рамках пространственно-временной связи $x=Vt$. Степень количественного совпадения этих результатов позволяет признать верификационную процедуру состоявшейся.

Другая серия экспериментов была выполнена по такой же схеме с моделью телесной пластины (толщина 0.05 м) с оживальным скруглением передней и задней кромок. Одним из непредсказуемых априори результатов оказалось существование ненулевой поперечной (подъемной) силы на пластине при расстоянии $h < 0.7$, не несущей в принципе в свободном потоке. В качестве причины такого явления рассматривались особенности отрывной структуры течения около кромок пластины, что впоследствии было подтверждено примерами численного математического моделирования ситуации.

1. Айрапетов А.Б., Катунин А.В., Стрекалов В.В. Измерение скоростей потока за плохообтекаемым телом визуализационно-видеографическим методом// Тезисы XXVI научно-технической конференции по аэродинамике. 2015 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛЕСНОЙ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ НАД НЕПОДВИЖНЫМ ЭКРАНОМ

А.В. Катунин

Научно-исследовательский московский комплекс «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», Москва
e-mail: katunin_a_v@rambler.ru

Существует широкий класс задач, в которых происходит аэродинамическое взаимодействие движущихся в воздушной или иной сплошной среде тел с близко расположенной неподвижной поверхностью (экраном). Практическими примерами, где реализуются такие течения, являются: летательные аппараты на режиме взлёта/посадки, движение экраноплана в штатном режиме, течения в зазорах между автомобильным транспортом и дорожным полотном, между составом метро или, скажем, аппарата Hyperloop компании Tesla и тоннелем.

В случае экранного эффекта для несущих поверхностей условно можно выделить два случая: область «нормального» экранного эффекта, когда при приближении к экрану с бесконечности до некоторого расстояния подъёмная сила увеличивается, и «аномального», когда, начиная с некоторого расстояния от экрана при дальнейшем приближении, подъёмная сила начинает уменьшаться. Подавляющая часть работ посвящена исследованию в области «нормального» экранного эффекта (например, [1]). При этом при существующей в различных работах параметрике отсутствует разделение на отдельное влияние несущих свойств и толщины (телесности, объёма) исследуемого тела на исследуемый эффект.

В работе представлена попытка рассмотреть задачу влияния телесности объекта на экранный эффект, для чего проведены серии двумерных аэродинамических расчётов вязкого обтекания плоской телесной пластины над неподвижной безграничной поверхностью. На рисунке приведён пример такого течения. В качестве валидации расчётной методики приведено сравнение с экспериментальными результатами полей скоростей в зазоре между движущейся пластиной и неподвижной поверхностью [1].

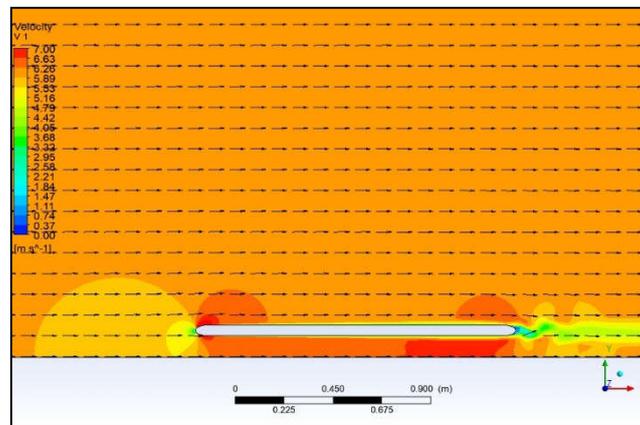


Рис. Расчётная картина обтекания пластины вблизи неподвижной поверхности в прямом движении.

Параметрами задачи являлись: толщина пластины, расстояние между пластиной и экраном, число Рейнольдса. Из анализа графиков интегральных аэродинамических сил можно заключить, что даже для не обладающего в безграничном потоке несущими свойствами тела (плоская телесная пластина), экранный эффект сопровождается явлением возникновения подъёмной силы. Подробный анализ структуры течения в зазоре между движущейся пластиной и неподвижной поверхностью позволяет выявить причину такого неожиданного поведения, которое в своей основе связано с особенностями обтекания передней и задней кромок пластины.

1. Айрапетов А.Б., Катунин А.В. Анализ средствами математического моделирования особенности аэродинамики моделей ЛА при испытании в АДТ на стендах с различными схемами, моделирующими приэкранную аэродинамику// Сборник докладов XI международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2016». М., 2016 г. С. 130

ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИОННО-ГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ В ИССЛЕДОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ТЕЧЕНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДАХ ПРЯМОГО И ОБРАЩЁННОГО ДВИЖЕНИЯ

А.Б. Айрапетов, А.В. Катунин, В.В. Стрекалов

Научно-исследовательский московский комплекс «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», Москва

e-mail: katunin_a_v@rambler.ru

Коллективом авторов в рамках государственных контрактов с Министерством промышленности и торговли был создан макет мобильной измерительной системы (МИС) измерения малых скоростей воздушного квазидвумерного потока, основанной на принципах визуализационно-видеографической системы (ВВИС) [1] - прямого оптического метода измерения сверхмалых скоростей. В целях демонстрации работоспособности МИС при работе с широким кругом задач были проведены серии экспериментов по исследованию структуры течения как в случае прямого движения, так и обращённого. Ниже на рисунке для иллюстрации приведена структура течения струй индивидуальной системы кондиционирования в салоне самолёта, обдувающих голову манекена пассажира.

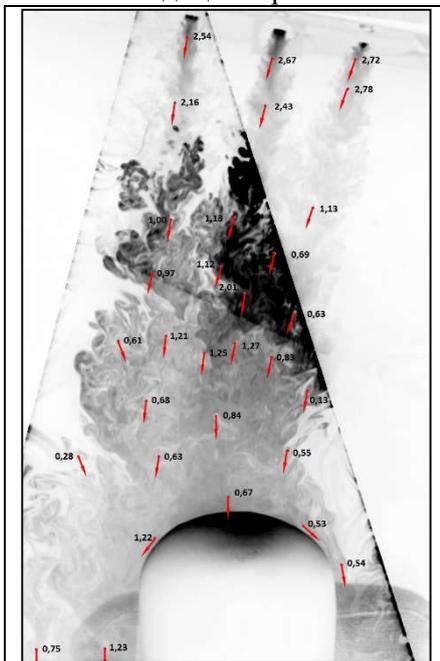


Рис. Структура течения струй индивидуальной системы кондиционирования с салоне самолёта, обдувающих голову манекена пассажира, стрелки обозначают направление потока, а цифры – скорость потока в данной точке в м/с.

Возможности ВВИС и мобильного измерительного комплекса МИС в конфигурации 2019 г. были исследованы на нескольких типах квазидвумерных течений, таких как:

- серия экспериментов на установке прямого движения - скоростном гидроцентре ЦАГИ (ГСС, г. Дубна) – по изучению течения в зазоре между движущейся над неподвижным экраном пластиной;

- течение, индуцируемое пролетом натурной действующей модели микроБПЛА типа «летающее крыло» с двумя работающими винто-моторными группами (ВМГ);

- течение в лабораторной «установке зеркальных моделей» в аэродинамической трубе (АДТ) Т-23 ЦАГИ;

- течение тангенциального вдува из плоского сопла регулируемой геометрии в потолочной зоне салона пассажирского самолета (Испытательная лаборатория экологического контроля (ИЛЭК), борт Як-42);

- течение в толстом (~1,5 м) пристенном погранслое рабочей части АДТ Т-2 ЦАГИ при работе её в едином контуре с АДТ Т-1.

Последняя работа сопровождалась иллюстрацией эффективности предложенной системы управления формой погранслоя путем естественного вдува воздуха в рабочую часть Т-2, возникающего при сдвигении диффузора, соединяющего Т-1 и Т-2, что является органическим свойством конструкции АДТ Т-1-2. Таким образом продемонстрирована возможность естественного превращения Т-1-2 в АДТ «ландшафтного типа», принципиально не требующая реконструкции трубы.

1. Айрапетов А.Б., Катунин А.В., Стрекалов В.В. Измерение скоростей потока за плохообтекаемым телом визуализационно-видеографическим методом// Тезисы XXVI научно-технической конференции по аэродинамике. 2015 г.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В.М. Кац, В.А. Морозов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

e-mail: v.kats@spbu.ru

Известно, что ввиду неравновесного и инерционного характера процессов, протекающих в материале при его высокоскоростном нагружении, процесс такого нагружения (и последующего разрушения) носит характер, существенно отличный от известных результатов для случая стационарных и квазистационарных нагружений. Исследование малоизученных процессов такого рода является актуальной задачей современной механики деформируемого твердого тела и имеет приложения в высокотехнологичных инновационных отраслях экономики.

На основе проводимых в течение последних лет исследований по применению электрофизических методов нагружения и разрушения материалов [1-3], нами разработана методика динамического нагружения вплоть до разрушения цилиндрических оболочек посредством электрического взрыва проводника.

Для проведения испытания внутрь отрезка трубки из исследуемого материала помещается (запрессовывается или заливается в расплавленном состоянии) диэлектрический наполнитель, по оси которого располагается взрываемый проводник (медь, диаметр 250мкм). Взрыв проводника производится посредством разряда через него конденсатора (емкость 0,5мкФ, заряд до 20-30кВ, период напряжения при разряде 7мкс).

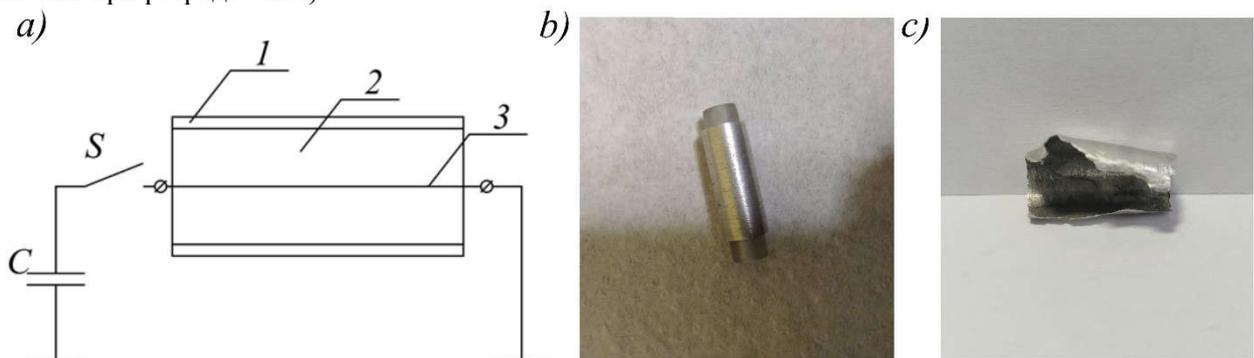


Рис. Схема проведения опыта (а): 1- испытываемый образец, 2 – диэлектрический наполнитель, 3 – проводник, С – конденсатор, S – разрядник; образец до (b) и после (c) нагружения.

Методика позволила провести испытания алюминиевых трубок внутренним диаметром 6мм и с толщиной стенки 0,5-1мм. В качестве диэлектрического наполнителя использовался полиметилметакрилат (ПММА). Нагружения производились с давлениями, близкими к пороговым значениям.

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. Savenkov, G., Morozov, V., Kats, V. Strength of the phase change materials on loading with the products of electric explosion of conductors // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1959. 100007.

3. 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.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ОТРЫВ ВИХРЕЙ ДУХИНА ПРИ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В.М. Козлов¹, А.Д. Алтухов¹, Т.С. Куреева¹, Е.А. Франц²

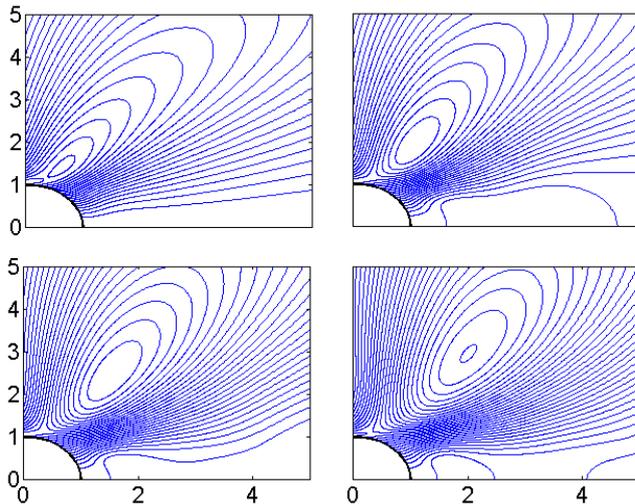
¹МБОУ Лицей № 4, Краснодар

² Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

e-mail: eafrants@fa.ru

Электрофорез диэлектрических частиц изучается на протяжении более ста лет. Особый интерес при этом уделяется скорости движения таких частиц, выражение для оценки которой впервые было получено Смолуховским. Согласно его формуле, скорость частицы линейно зависит от напряженности электрического поля. Однако, как было показано позже, эта формула справедлива только для слабого электрического поля и небольших значений дзета-потенциала, иначе начинают проявляться нелинейные эффекты. Теоретическое описание некоторых из них появились сравнительно недавно [1-3], причем по большей части были предложены только асимптотические методы для некоторых частных случаев.

Для приложений практики, кроме скорости электрофореза так же важно знать распределения скорости потока жидкости, электрического потенциала и концентрации ионов около поверхности микрочастицы. Численное моделирование задачи в сильном электрическом поле показало, что около диэлектрической частицы образуются вихри, которые были ранее описаны в работах Духина и Мишук, посвященных электрофорезу ионоселективных частиц.



На рисунке изображен процесс распространения вихря. Его зарождение происходит около поверхности частицы при значении угла близком к 90° . После формирования вихрь начинает отдаляться от поверхности частицы и вытягиваться вдоль течения. Этот процесс заканчивается при предельном значении угла около 60° . Для всех расчетов предельный угол менялся слабо и находился в диапазоне $50-60^\circ$. При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля микровихрь теряет стационарность и происходит его периодический отрыв от поверхности и унос потоком жидкости. При достаточно большой напряженности отрыв приобретает хаотический характер. Явление

сильно напоминает образование цепочки Кармана, но в силу приближения ползущего течения имеет другой физический механизм.

Существование стационарного вихря физически объясняется неравномерностью распределения заряда, а, следовательно, и силы Кулона вблизи поверхности частицы. Объяснить отрыв вихря можно с помощью предположения, использованного в асимптотическом анализе, а именно обращении в ноль члена с объемной электрической силой в уравнении Стокса (за пределами слоя Дебая). Численные расчеты показывают, что такое предположение верно только для достаточно малых напряженностей поля. При достаточно больших значениях напряженности происходит необычное явление: заряд начинает увлекаться потоком жидкости и выходит во внешнюю область. Одно из следствий этого – невыполнение баланса сил, что и приводит к отрыву вихря.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-48-235001 р_Наставник.

1. O. Schnitzer, E. Yariv. Macroscale description of electrokinetic flows at large zeta potentials: Nonlinear surface conduction. *Physical Review E*, 2012, 86(2), 021503.

2. O. Schnitzer, R. Zeyde, I. Yavneh. Weakly nonlinear electrophoresis of a highly charged colloidal particle. *Physics of Fluids*, 2013, 25(2), 052004.

3. O. Schnitzer, E. Yariv. Nonlinear electrophoresis at arbitrary field strengths: small-Dukhin-number analysis. *Physics of Fluids*, 2014, 26(12), 122002.

СУЩЕСТВОВАНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛОЖЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ СПУТНИКА С ПЕРЕМЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАСС

А.А. Буров, И.И. Косенко, А.А. Кириенко

Московский Авиационный Институт (Национальный исследовательский университет), Москва

e-mail: forestflaim@gmail.com

На заре изучения динамики спутников, в так называемом «спутниковом приближении», то есть в случае, когда размеры спутника значительно меньше расстояния до притягивающего центра, является частичным разделением движения: ориентационное движение спутника вокруг центра масс существенно не влияет на движение Кеплеровского центра масс спутника. В то же время движение центра масс спутника существенно влияет на изменение его положения. Использование истинной аномалии в качестве независимой переменной, вероятно, происходит на основании работы Бине, что дает возможность интегрировать задачу Кеплера и одно из двух тел. Впоследствии аналогичная переменная была применена в задаче о трех телах Леви-Чивиты и Нехвилла.

Такое свойство движения центра масс, которое наблюдалось, позволило Белецкому использовать после упомянутой классики истинную аномалию в качестве независимой переменной. Было выведено так называемое «уравнение Белецкого», которое было успешно применено для описания динамических свойств движения спутника по круговой и эллиптической орбитам. Вероятно, необходимость компенсировать колебания спутника, возникающие из-за перераспределения внутренних масс, например смещения экипажа, циркуляции жидкостей, привела к идее принудительного перераспределения масс спутника в зависимости от его положения на Кеплеровской орбите. Начало исследований существования относительных равновесий спутников и их устойчивости при периодическом распределении внутренних масс было найдено в перечисленных выше работах.

В данной работе рассмотрена задача исследования динамики относительного движения спутника с переменными свойствами инерции, объектом исследования является притягивающий центр, неподвижный в пространстве со спутником с пульсирующим тензором инерции. Для решения поставленной задачи были выдвинуты основные предположения: спутниковое приближение (центр масс движется вдоль постоянной предписанной Кеплеровой орбиты) и деформация спутника таковы, что главные центральные оси инерции неподвижны относительно его «твердого» каркаса (меняться могут только величины моментов инерции). После проведения ряда вычислений были получены численные и графические решения в поставленной задаче.

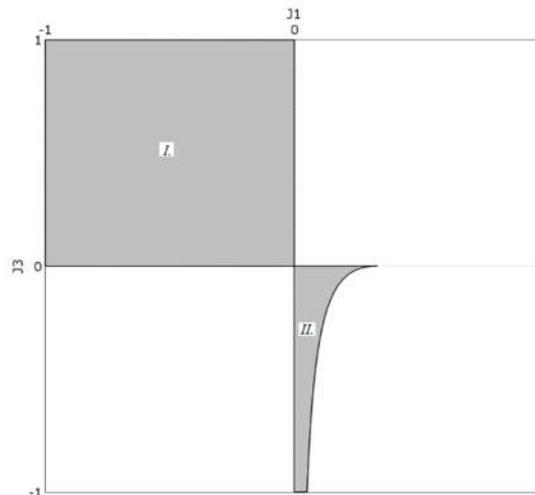


Рис. Вычисленная аналитически область устойчивости на плоскости (J_1 , J_3) для $\epsilon = 0$.

1. V. V. Beletskii, Motion of an artificial satellite about its center of mass, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1966.

2. A. Burov, I. Kosenko, On plane oscillations of a body with a variable mass distribution in an elliptic orbit, Proc ENOC 2011, Rome, Italy.

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО РАЗРЫВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

В.А. Кобзев^{1,2}, Н.Г. Чеченин², К.А. Букунов², Е.А. Воробьева², А.В. Макунин²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

² МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

е-mail: kobzzzev@mail.ru

Одной из актуальных задач механики является создание материалов, устойчивых к воздействию скоростных частиц. В настоящее время наиболее перспективными конструкционными материалами являются композиты, сочетающие в себе свойства различных компонентов и эффективно противостоящие ударным нагрузкам.

Нанокompозиты – новый тип материалов, отличающийся от обычных композиционных материалов размером упрочняющей фазы. Нанокompозиты способны реализовать высокий уровень как специальных свойств материалов, (электропроводность, магнитная проницаемость, теплопроводность) так и механических свойств (прочность, ударная вязкость, твёрдость). Одними из самых перспективных наполнителей для изготовления нанокompозитов являются углеродные нанотрубки (УНТ). В работе изучено изменение свойств композитных материалов при введении УНТ в матрицу. Сегодня основным методом разработки новых типов композитных материалов служит эксперимент.

Высокая стоимость материалов и большой объем варьируемых параметров приводят к значительным затратам средств и времени при создании новой конструкции. В связи с этим возрастает потребность в аналитических и численных методах, позволяющих выполнять достоверный анализ динамических процессов, связанных с пробиванием преград со сложной структурой, и прогнозировать поведение всей защитной конструкции. Построение вычислительных моделей позволяет проводить оценку эффективности различных вариантов защитных конструкций при минимальных затратах.

В работе проведено изучение структурных и функциональных свойств композитных материалов, армированных углеродными нанотрубками. Разработана численная модель на основе метода конечно-дискретных элементов реалистично описывающая деформирование и разрушение опытных образцов при ударном воздействии.

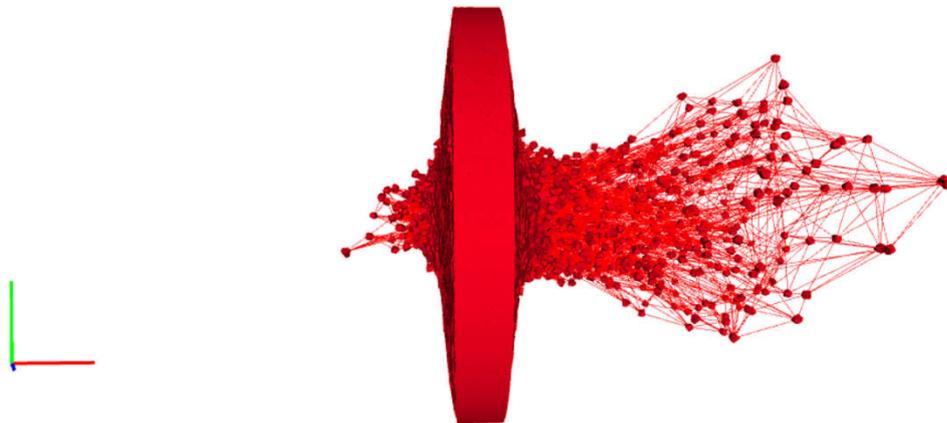


Рис. Компьютерное моделирование пробивания композитного материала высокоскоростным снарядом.

1. Kobzev V. A., Chechenin N. G., Bukunov K.A., Vorobyeva E.A., Makunin A.V., Structural and functional properties of composites with carbon nanotubes for space applications, 2018, Materials Today: Proceedings, издательство Elsevier B.V.(Netherlands), том 5, № 12.

2. Макунин А.В., Чеченин Н.Г. Полимер-нанокompозиты для космических технологий, «Университетская книга» 2011 г.

3. Воробьева Е.А., Бачурин К.Е., Макунин А.В., Чеченин Н.Г. Синтез и исследование нанокompозитов с включением углеродных нанотрубок в сборнике. Труды XII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва 21-22 ноября 2011. НИИЯФ МГУ Москва.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ВОДЕ И РАСТВОРАХ NaCl

М.В. Козлов¹, К.А. Рыбкин¹, М.О. Кучинский¹, Т.П. Любимова^{1,2}

¹ Физический факультет ПГНИУ, Пермь

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: cozlov.maks@mail.ru

В настоящей работе экспериментально показана возможность визуализации акустических течений в воде и растворах NaCl. Эксперименты проводились в кювете размерами 110×116×160 мм³, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда. Кювета была изготовлена из оргстекла толщиной 3 мм. Электродинамический источник ультразвука находился заподлицо с дном кюветы. Для регистрации динамики пузырьков использовалась высокоскоростная камера. Более подробно методика эксперимента и его специфические особенности описаны в статьях [1, 2]. В качестве рабочих жидкостей использовались: дистиллированная вода, водные солевые растворы NaCl с массовым содержанием соли от 0% до 30%.

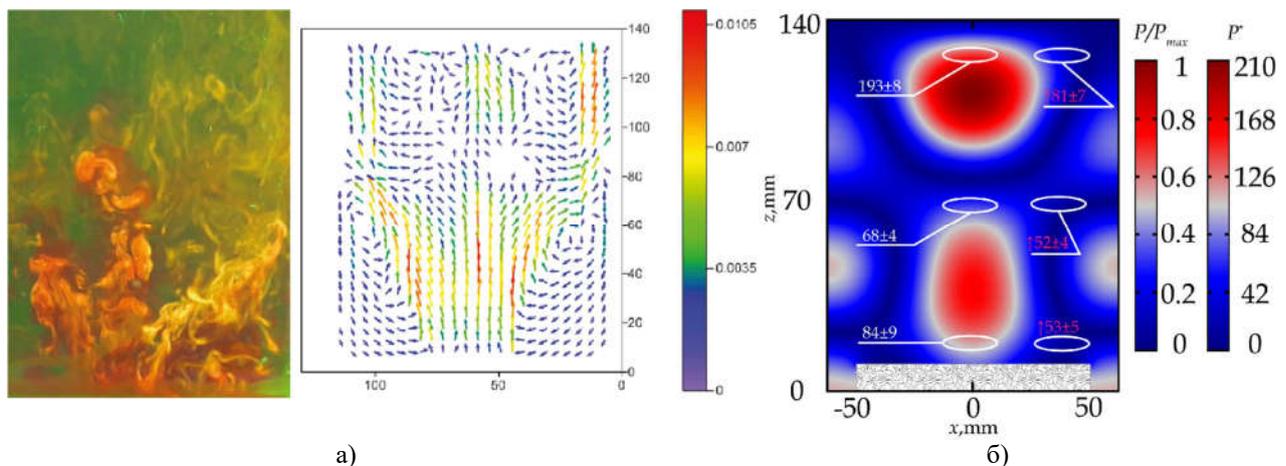


Рис. 1. а) Визуализация структуры акустического УЗ течения: а – флуоресцентным методом, б - с использованием PIV и обработкой методом главных компонент. б) Распределение абсолютного значения относительного акустического давления.

Воздействие горизонтального излучателя УЗ на жидкость сосредоточено в цилиндрическом объёме, в котором выделяют несколько зон в зависимости от расстояния от излучателя. В предварительных экспериментах был использован флуоресцирующий метод визуализации течения. В качестве флуоресцирующего вещества был использован родамин (рис.1, а). Затем, для оценки влияния ультразвукового источника на различные жидкости и растворы был применён метод PIV (Particle Image Velocimetry) – цифровой трассерной визуализации (рис.1, а). Использование данных методов позволило продемонстрировать возможность визуализации акустического течения, а также изучить некоторые его особенности связанные, как показали численные расчеты, с распределением акустического давления в полости ячейки (рис. 1, б). На рис. 1, б используется две маркерные цветовые шкалы. Первая шкала показывает нормированное на максимальное значение давление, фиксируемое в исследуемой области – P/P_{max} . Вторая шкала показывает численное значение среднего значения давления регистрируемого датчиком – P^* . На рис. 1 наблюдается качественное совпадение течения возникающего в жидкости при визуализации с использованием родамина, PIV, проведённого с использованием метода главных компонент, и численного расчета.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

1. Козлов М. В., Рыбкин, К. А., Фатталов, О. О., Любимова, Т. П. Динамика парогазовых пузырьков вблизи твердых поверхностей в солевых растворах при дегазации // Теория, эксперимент и новые технологии: конф. (Новосибирск – Шерегеш, 28 февраля-06 марта 2020 г). Новосибирск: Издательство Параллель, 2020. С. 90–91.

2. 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.

ПАРНЫЙ КОРРЕЛЯТОР В ЗАДАЧЕ МАГНИТНОГО ДИНАМО

А.В. Копьев¹, А.С. Ильин^{1,2}, В.А. Сирота¹, К.П. Зыбин^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²НИУ ВШЭ, Москва

e-mail: kopyev@lpi.ru

Рассматривается вынужденное мелкомасштабное магнитное поле, переносимое изотропным турбулентным потоком. Предполагается, что случайная движущая сила распределена в конечной области с масштабом, меньшим, чем вязкий масштаб потока. Рассматривается линейная стадия эволюции магнитного поля, переносимого изотропным турбулентным потоком; обратная связь магнитного поля с динамикой потока не предполагается. Мы ограничиваем наше рассмотрение вязким масштабом, где поле скоростей является гладким и, следовательно, локально описывается тензором градиентов скорости. На этих масштабах возможно экспоненциальное увеличение корреляций магнитного поля, тогда как в инерциальном диапазоне оно ограничено степенным законом [1, 2].

В данной работе аналитически показано, что в данной постановке двухточечный коррелятор имеет на больших временах стационарный предел для любой разумной статистики скорости [3]. Найдено стационарное решение, которое подчиняется степенному закону. Рассчитано, что для гауссова распределения поля скорости (а также для других потоков с симметричным спектром Ляпунова) показатель степени равен -3 , также посчитана малая поправка к степени для слабого отклонения от гауссова случая; в случае общего негауссова градиента скорости показатель степени выражен через кумулянтную функцию распределения тензора градиентов скорости.

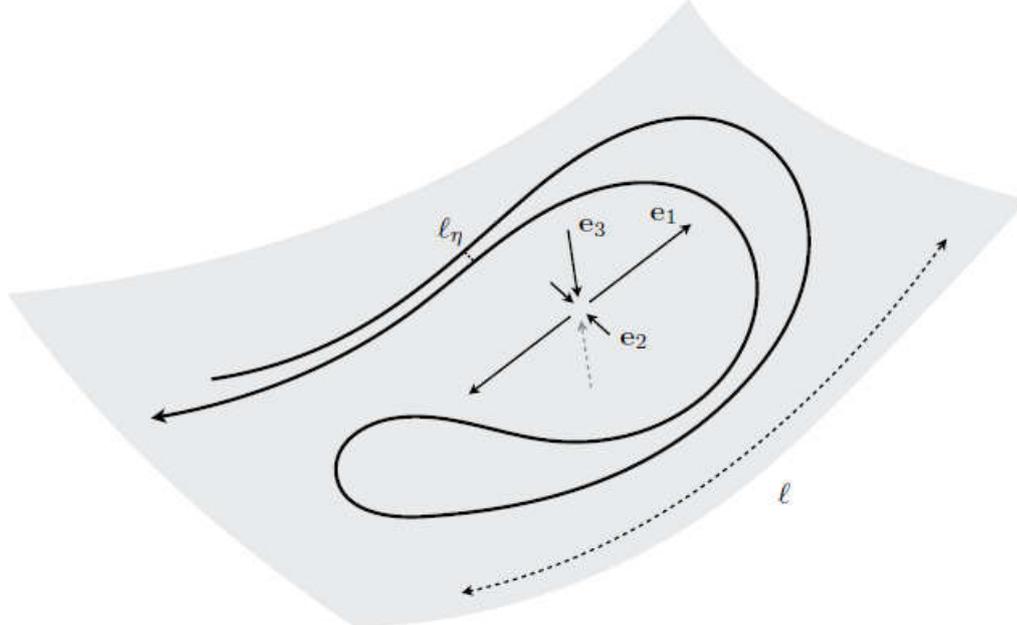


Рис. Структура магнитного поля в складках, перпендикулярных локальному направлению сжатия e_3 поля сдвиговой скорости (случай $c_2 < 0$) [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-12-00047 «Самосогласованная теория космических лучей в молекулярных облаках».

1. Казанцев А.П. Об усилении магнитного поля проводящей жидкостью // ЖЭТФ, 1967, 53, 5 (11), 1806-1813.
2. Vergassola M., Anomalous scaling for passively advected magnetic fields // Phys. Rev. E, 1996, 53, R3021.
3. Копьев А.В., Ильин А.С., Сирота В.А., Зыбин К.П. Stationary scaling in small-scale turbulent dynamo problem // Phys. Rev. E, 2020, 101, 063102.
4. Rincon, J., Dynamo theories // Plasma Phys., 2019, 85, 205850401.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА.

Ю.В. Корнев, Н.А. Семенов, Ю.О. Соляев, Х.Х. Валиев
Институт прикладной механики РАН, Москва
e-mail: yurikornev@mail.ru

Эластомерные композиты – одни из наиболее перспективных конструкционных материалов, изделия из них широко востребованы и применяются в автомобильной, авиационной, космической, нефтеперерабатывающей и др. промышленности. При создании эластомерных композитов, конструкций и изделий из них в последнее время существенное внимание уделяется вопросам экологии, а также повышению экономической эффективности и энергоэффективности при их производстве. В связи с этим, разработка новых типов упрочняющих дисперсных наполнителей для композиционных материалов, в том числе и природного происхождения, обеспечивающих оптимальный баланс механических свойств композитам и имеющих преимущества по стоимости перед существующими, является актуальной задачей.

Развитие представленного направления исследований включает разработку принципов создания композитных материалов на основе полимерных и эластомерных матриц и нового класса наноструктурированных минеральных наполнителей природного происхождения различного строения (например, шунгит, диатомит, галлузит, продукты переработки рисовой шелухи и др.), а также исследование особенностей механического поведения и эффектов упрочнения в таких композитах. Предложенные новые исходные материалы для получения упрочняющих наполнителей эластомерных композитов, отличаются от существующих упрочняющих наполнителей (например, техуглерода и коллоидной кремнекислоты), меньшими затратами при получении, экологической безопасностью и, в зависимости от параметров их структуры, позволяют обеспечить полимерным композитам ряд уникальных свойств [1].

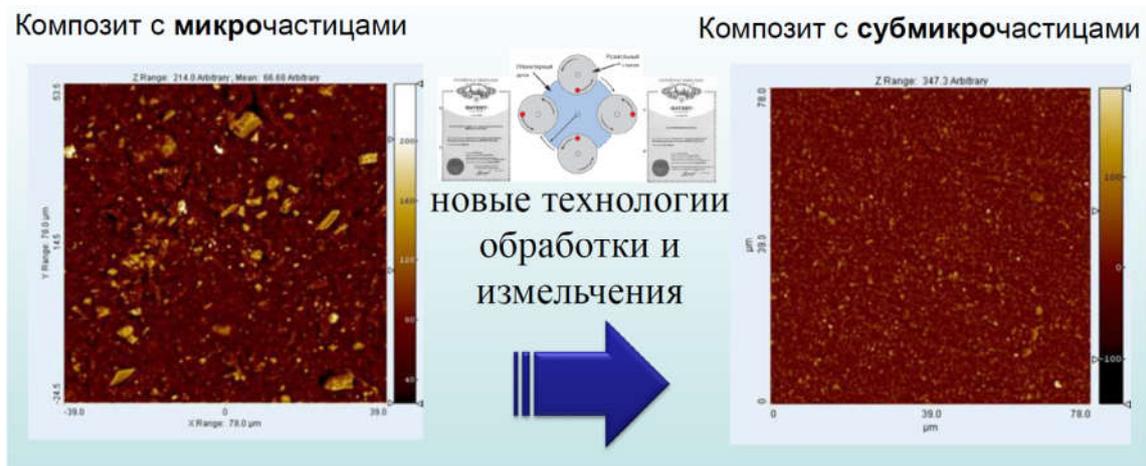


Рис. Применение технологий измельчения природных материалов в составе эластомерных композитов.

Полученные экспериментальные данные показывают на значительный эффект упрочнения до пяти раз при уменьшении среднего размера частиц. Установлено, что наиболее эффективными с точки зрения эффекта упрочнения при применении в качестве наполнителя являются частицы на основе аморфного диоксида кремния, полученные из продуктов переработки рисовой шелухи, и порода шунгит. Показано существенное влияние функциональности поверхности и соотношения углерод/диоксид кремния субмикронных частиц наполнителя на механические свойства эластомерных композитов. Установлено, что новые классы упрочняющих наполнителей в перспективе могут быть рекомендованы для практического применения.

Исследование выполнено в рамках проекта АААА-А19-119012290177-0.

1. Yu. V. Kornev, O.V. Boiko, D.V. Guskov, N.A Semenov. Experimental investigation of the reinforcing effect of organosilane-modified nanodispersed mineral shungite in elastomeric composites. // Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal, 2016. -3 (7): - p. 189-200.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗДУВАНИЯ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОЭЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Е.А. Коровайцева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: katrell@mail.ru

Рассматривается задача осесимметричного динамического деформирования составных тонких оболочек вращения из несжимаемых высокоэластичных материалов в предположении произвольных перемещений и деформаций. Напряженное состояние оболочки считается двухосным. Поведение оболочки описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и нелинейных алгебраических уравнений. Система дополняется начальными и граничными условиями.

Для решения задачи используется метод прямых в продольном варианте. При конечно-разностном представлении векторов ускорений и скоростей применяется неявная четырехточечная аппроксимация производных по Хуболту на сетке постоянного шага с использованием законтурных точек на первых шагах по времени. В результате исходная система уравнений динамического деформирования оболочки приводится к V канонической форме [1].

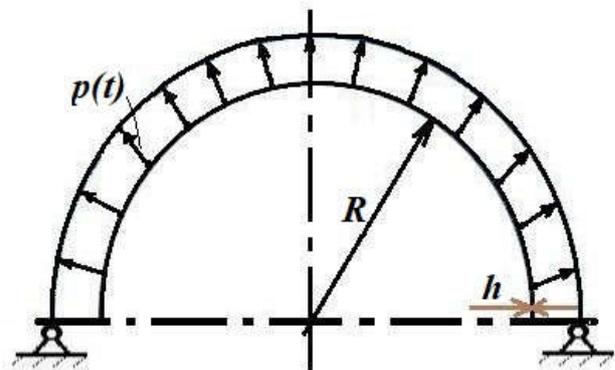


Рис. Расчетная схема динамического раздувания мягкой оболочки вращения.

Для решения полученной нелинейной краевой задачи в обыкновенных производных используется метод дифференцирования по параметру [2]. При этом вектора обобщенной нагрузки определяются по заданным функциям распределенного давления и значению силы инерции на предыдущем шаге по времени. В соответствии с шаговой концепцией применяемого метода вводится параметр нагрузки и параметр продолжения решения. Решение нелинейной краевой задачи проводится на текущем шаге по времени в интервале значений параметра нагрузки $\alpha \in [0; 1]$. После анализа решения задачи при параметре нагрузки $\alpha = 1$ осуществляется переход к следующему шагу по времени.

Приведены результаты тестирования алгоритма на примере решения задачи о раздувании полусферы переменным во времени равномерно распределенным по меридиану давлением.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект 19-38-70005 мол_a_мос).

5. Коровайцева Е.А. Систематизация одномерных краевых задач механики деформируемого твердого тела // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=112827>.

6. Давиденко Д.Ф. Об одном новом методе численного решения систем нелинейных уравнений // ДАН СССР. 1953. № 4. С.601-602.

СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ПРЕПОДАВАНИЮ БАЗОВЫХ КУРСОВ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Е.А. Коровайцева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: katrell@mail.ru

В работе представлена методика обучения дисциплинам механики твердого тела, основанная на выделении типов решаемых задач и разработке алгоритмов решения для каждого типа. Особое внимание уделено курсам сопротивления материалов и строительной механики как важнейшим для развития навыка осознанных расчетов в инженерной и научно-исследовательской деятельности.

В рамках этой методики задачи курса сопротивления материалов аккумулярованы в 22 типа, для каждого из которых сформулированы краткие алгоритмы решения [1]. Также подчеркивается единство задач расчета различных типов напряженно-деформированного состояния бруса с точки зрения их математической формулировки (рис. 1). Такой подход к обучению позволяет резко сократить объем знаний, подлежащих запоминанию, при одновременном повышении их качественного, обобщающего уровня.

Понятие	Типы напряженных состояний				Структурные формулы
	Растяжение-сжатие	Кручение	изгиб		
			Прямой чистый	Прямой поперечный	
Дифференциальное уравнение равновесия	$\frac{dN}{dx} = -q_x(x)$	$\frac{dM_k}{dx} = -m_k(x)$	$\frac{dM_z}{dx} = -m_z(x)$	$\frac{dQ_y}{dx} = q_y(x)$ $\frac{dM_z}{dx} = Q_y(x)$	$\frac{dR}{dx} = q(x)$
Расчет максимальных напряжений	$\sigma_x = \frac{N}{F}$	$\tau_{\max} = \frac{M_k}{W_k}$	$\sigma_{x, \max} = \frac{M_z}{W_z}$	$\sigma_{x, \max} = \frac{M_z}{W_z}$	$\sigma = \frac{R}{W}$
Закон Гука	$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$	$\tau = G \cdot \gamma$	$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$	$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$	$\sigma = E \cdot \varepsilon$

Рис. 1. Структуризация соотношений для расчета компонент напряженного состояния бруса.

Использование структурного подхода в курсе сопротивления материалов позволяет несложно перейти к обучению курсу строительной механики как центральному в воспитании умения проводить расчеты реальных конструкций. Предлагается, после ознакомления студентов с теоретическими основами курса, демонстрация единства рассматриваемых как в курсе строительной механики, так и в расчетной практике задач с точки зрения математической постановки. Так, для курса строительной механики предлагается введение трех канонических форм линейных краевых задач механики деформируемого твердого тела, которые могут описывать поведение как простейших, так и составных разветвленных конструкций. Указанные формы могут быть использованы для структуризации записи уравнений деформирования элементов конструкций любого типа.

Аналогично курсу сопротивления материалов, для каждой канонической формы представляется алгоритм решения соответствующей задачи.

Следствием такой методики обучения является как формирование комплексного структурного мышления, так и воспитание культуры научной деятельности, которая является необходимым условием защиты компьютерной поддержки научных и инженерных исследований от ошибочных действий вычислителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект 19-38-70005 мол_а_мос).

1. Коровайцев А.В., Коровайцева Е.А., Столярчук В.А. Структурный подход в расчетах прочности и устойчивости простейших элементов конструкций летательных аппаратов. ЛЕНАНД, Москва. 2015.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОДНОМЕРНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И АЛГОРИТМЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Е.А. Коровайцева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: katrell@mail.ru

Для проведения систематизации одномерных краевых задач МДТТ выбрано направление решения задач, которое связано с необходимостью использования систем дифференциальных уравнений. Достаточность рассмотрения только одномерных задач обусловлена тем, что построение алгоритмов решения многомерных задач не вызывает принципиальных методических затруднений по сравнению со случаем одномерных задач. Независимо от типа исследуемых конструкций, при описании исходной задачи используется единая векторно-матричная форма. Привлекаемые дифференциальные уравнения могут быть двух типов: линейные и нелинейные без ограничения на диапазон исследуемых нелинейностей. В каждом из типов краевых задач рассматриваются три формы:

- 1) двухточечная краевая задача,
- 2) многоточечная неразветвленная краевая задача,
- 3) многоточечная разветвленная краевая задача.

Введенные в итоге шесть форм краевых задач считаются каноническими. Характерной особенностью введенной канонизации форм является выделение разрешающего вектора искомых переменных, дифференцируемого по координате, а также вектор-функции исходных значений параметров задачи.



Выделение восьми типов простейших линейных краевых задач МДТТ

Также построены еще шесть форм краевых задач с дополнительными алгебраическими соотношениями, являющихся наиболее употребительными при решении прикладных задач механики деформирования конструкций. Эти формы могут быть приведены к линейным каноническим с помощью тождественных преобразований (для линейных задач) либо к квазилинейным каноническим формам при составлении алгоритма решения, основанного на использовании метода дифференцирования по параметру (для нелинейных задач).

Таким образом, предлагаемая систематизация одномерных краевых задач МДТТ, основанная на использовании векторно-матричной формализации разрешающих соотношений, позволяет сократить количество требующих рассмотрения задач и разрабатываемых методик и алгоритмов их решения, одновременно повысив

универсальность последних [1]. Минимально возможный круг алгоритмов решения одномерных задач МДТТ связан с шестью введенными каноническими формами, а при программировании алгоритмов решения всех рассматриваемых типов краевых задач базовыми являются лишь три программы для решения линейных задач, соответствующих первым трем каноническим формам.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект 19-38-70005 мол_a_мос).

1. Гуськов А.М., Коровайцева Е.А. Алгоритм метода сегментации модального анализа одномерных линейных краевых задач механики деформируемого твердого тела // Вторая всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике»: сборник трудов. 2017. С. 38-41.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

И.В. Красняков¹, Д.А. Брацун¹, Л.М. Писмен²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра «Прикладная физика», Пермь

²Израильский технологический институт – Технион, кафедра химической инженерии, Хайфа, Израиль
e-mail: krasnyakov_ivan@mail.ru

Недавние работы, посвящённые исследованию рака, говорят о том, что злокачественная опухоль не является просто однородным скоплением раковых клеток, которые претерпевают неконтролируемое деление. Опухоль представляет собой своеобразный организм, который живёт по собственным законам и правилам. В обзорной статье [1], которая является основной в этом смысле, подчёркивается гетерогенный характер опухоли. Внутри злокачественного образования происходит дифференциация клеток по группам, которые выполняют определённые специфические функции. Клетки одного типа могут образовывать такие морфологические структуры, которые помогают опухоли коллективно защищаться от различного рода терапий, а также повышают потенциал к появлению метастазов. При разработке лекарственных препаратов необходимо учитывать, что рак представляет собой сложную самоорганизующуюся систему, которая может адаптироваться к изменению внешних условий и менять свою форму поведения.

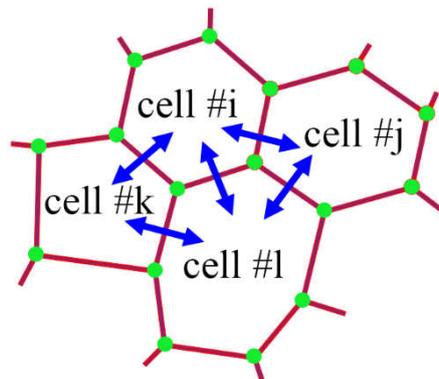


Рисунок. Схематическое изображение модели эпителиальной ткани: клетки, обменивающиеся химическими сигналами.

Разрабатываемая математическая модель представляет собой набор эластичных многоугольных клеток, обменивающихся хемомеханическими сигналами. Главными элементами модели являются: механизмы деления и интеркаляции клеток; возможность деформации ткани, за счёт механического воздействия; обмен химическим сигналом, осуществляемый между соседними клетками эпителия через общую границу. Также в модели разработана схема дифференциации клеток опухоли в общем социуме [2]. Механизмы деления и интеркаляции клеток, заложенные в модель, позволяют изучать процессы как коллективной миграции, так и миграции одиночными клетками. Всё перечисленное выше даёт возможность описывать развитие опухоли в ткани эпителия.

В работе [3] было исследовано образование опухолевых структур, состоящих из большого числа клеток. Целью представляемой работы является исследование морфологических структур, которые возникают в ходе коллективной инвазии злокачественных клеток карциномы. Сравнение этих структур с данными гистологических исследований, а также классификация структур с помощью Шварц-преобразования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/174.2

1. Tabassum D.P., Polyak K. Tumorigenesis: it takes a village. // Nat. Rev. Cancer., 2015. Vol. 8. P. 473–483.

2. Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Pismen L.M. Chemo-elastic modeling of invasive carcinoma development accompanied by oncogenic epithelial–mesenchymal transition // AIP Conference Proceedings., 2017. Vol. 1882. P. 020008.

3. Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Pismen L.M. Biomechanical modeling of invasive breast carcinoma under a dynamic change in cell phenotype: collective migration of large groups of cells // Biomech. Model. Mechanobiol., 2020. Vol. 19. P. 723–743.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ – ПРИМЕНЕНИЕ SHEARLET-TRANSFORM ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУР

И.В. Красняков, Д.А. Брацун

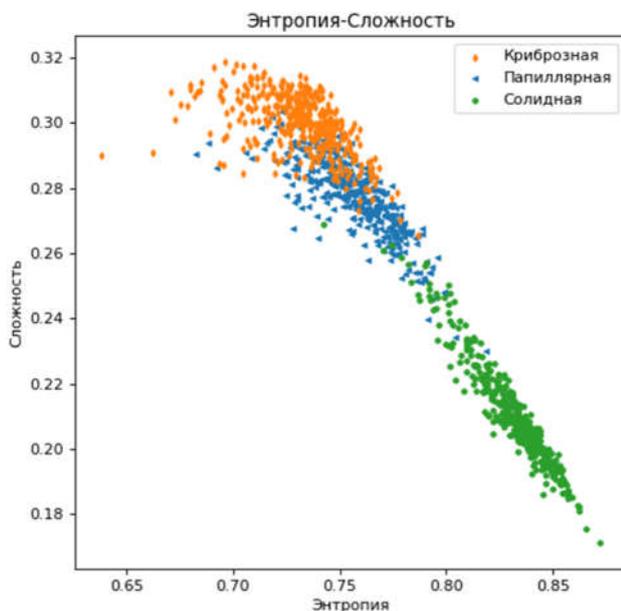
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра «Прикладная физика», Пермь
e-mail: krasnyakov_ivan@mail.ru

Результаты численного моделирования структурообразования инвазивной карциномы, полученные в работе [1], были классифицированы в параметрах энтропия-сложность при помощи Shearlet-преобразования. Представленный метод весьма практичный к использованию двумерных изображений [2]. Подход основан на понятии неравновесия и основан на статистике направленных мультимасштабных коэффициентов быстрого конечного Shearlet-преобразования, где используются энтропия Шеннона и меры расхождения Дженсена-Шеннона. Этот алгоритм кажется идеальным для оценки сложности паттернов роста карциномы, полученных в работе [1].

После вычисления нормированной энтропии $H[P] = \frac{S[P]}{S[P_e]} = -\frac{\sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i}{\log_2 N}$ и сложности

$C[P] = \frac{H[P]}{J_{\max}} \left(S\left[\frac{P+P_e}{2}\right] - \frac{1}{2}(S[P] + S[P_e]) \right)$ структуры основная информация о свойствах

рассматриваемой системы может быть получена из её расположения на плоскости энтропия-сложность. В нашем случае сложность ситуации заключается в том, что нам необходимо выявить значительную сложность опухолевой структуры, составленной из отдельных клеток, на фоне структуры самой клеточной структуры. Здоровая ткань также сильно изменена в ходе эволюции, из-за клеточного деления и интеркаляции, и сама является сложной упорядоченной структурой.



На рисунке показаны значения энтропии и сложности, рассчитанные на основе изображений образцов для трех типичных структурных типов роста карциномы, представляющих собирательные формы инвазии раковых клеток. Анализируя данные, представленные на рисунке, мы можем сделать вывод, что сложность криброзной карциномы является самой высокой из всех представленных паттернов. В свою очередь, папиллярная карцинома по своей сложности несколько уступает криброзной. Солидный паттерн следует признать самым простым: он имеет наименьшую сложность.

Методика, представленная в этом разделе, безусловно, может быть полезна при идентификации различных типов инвазивной карциномы как при численном моделировании, так и при первичном гистологическом анализе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/174.2

1. Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Pismen L.M. Biomechanical modeling of invasive breast carcinoma under a dynamic change in cell phenotype: collective migration of large groups of cells // Biomech. Model. Mechanobiol., 2020. Vol. 19. P. 723–743.

2. Brazhe A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns // Phys. Rev. E. 2018. Vol. 97. Art. 061301. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.061301

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

А.А. Кугаевская¹, К.А. Рыбкин¹, О.О. Фатталов¹, Т.П. Любимова^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

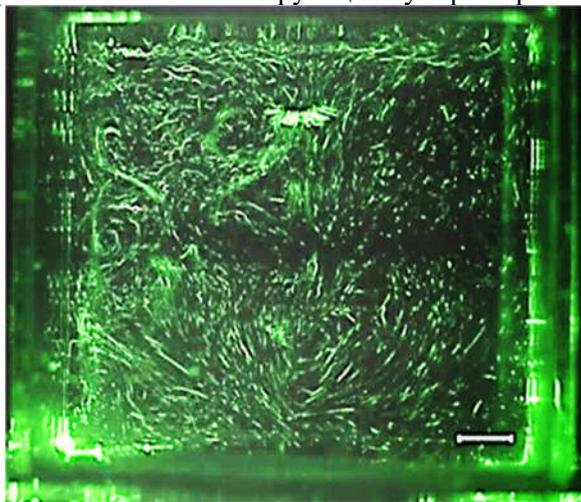
²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: annakuga99@gmail.com

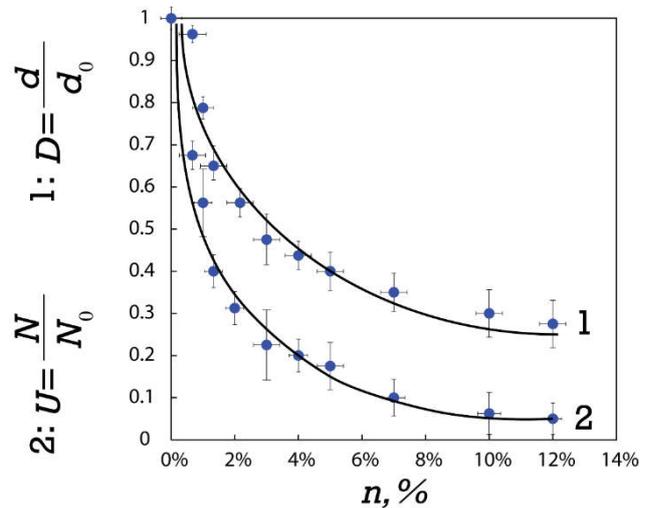
В работе экспериментально исследуются акустические течения и связанные с ними явления, возникающие при воздействии ультразвука на дистиллированную воду и водные растворы солей NaCl и KCl различной концентрации. Обсуждается зависимость возникающих течений и кавитационных пузырьков от состава жидкости и от мощности ультразвукового воздействия.

Эксперимент проводился в ячейке размером $110 \times 116 \times 160$ мм³, имеющей форму параллелепипеда. Центральная часть ячейки пронизывалась сбоку лазерным ножом, создаваемым цилиндрической линзой и зеленым DPSS лазером KLM-532. Для регистрации акустических течений использовалась высокоскоростная камера. В качестве исследуемых жидкостей использовались насыщенные растворы смеси химически чистых солей KCl и NaCl, а также, проводились эксперименты с дистиллированной водой и твердыми пластинами [1, 2]. На рис. 1 А показана характерная для дистиллированной воды иллюстрация возникающего процесса.

Эксперименты с насыщенными растворами солей NaCl и KCl показали, что при любой заданной мощности УЗ, возникают только инерционные кавитационные пузырьки. Была проведена серия экспериментов по изучению формирования и динамики кавитационных пузырьков в растворах с различными концентрациями NaCl и KCl. Эти эксперименты показали, что при низких концентрациях солей (ниже 2%), одновременно существуют два вида кавитации, причем порог инерционной кавитации выше, чем в дистиллированной воде. Ниже данного порога, на протяжении всей серии опытов кометообразные стримеры не появляются. При увеличении концентрации с 2% и до 13%, частота возникновения стримеров растет, а средний диаметр левитирующих пузырьков уменьшается. При 13% концентрации диаметр пузырьков уменьшается настолько, что из поля зрения исчезают практически все левитирующие пузырьки рис. 1 Б.



А



Б

Рис. 1. А) Объединенная из 125 кадров фотография, иллюстрирующая общий вид получаемого в воде течения. Частота съёмки 100 к/с, выдержка $1/100$ с. Б) Уменьшение среднего относительного диаметра пузырька D и их относительного количества N , при увеличении содержания солей калия в растворе от 0 до 14%.

Исследование выполнено за счет 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. Т. 879. №. 1. С. 012026.

2. Кугаевская А. А. и др. Экспериментальное исследование динамики кавитационных пузырьков в водных растворах NaCl и KCl вблизи твердых поверхностей //Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. 2020. С. 98-99.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА

М.О. Кучинский¹, К.А. Рыбкин¹, М.В. Козлов¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
e-mail: kat6chinskiy@gmail.com

Проблемы теплопереноса от компактных источников тепла активно обсуждаются в рамках задач об интенсификации теплообмена [1], которые оказываются тесно связанными с эффективностью охлаждения микроэлектронных устройств [2]. Одним из возможных методов охлаждения электронных устройств может выступать ультразвуковой (УЗ) излучатель.

Настоящее исследование выполнено с целью получения более полного представления о влиянии источника УЗ на конвективное течение образующее над нагревателем цилиндрической формы. В рамках настоящей работы проведены натурные эксперименты, которые позволили, исследовать и описать влияние ультразвука на характеристики конвективного течения, а также получить поля скорости над поверхностью нагревательного элемента.

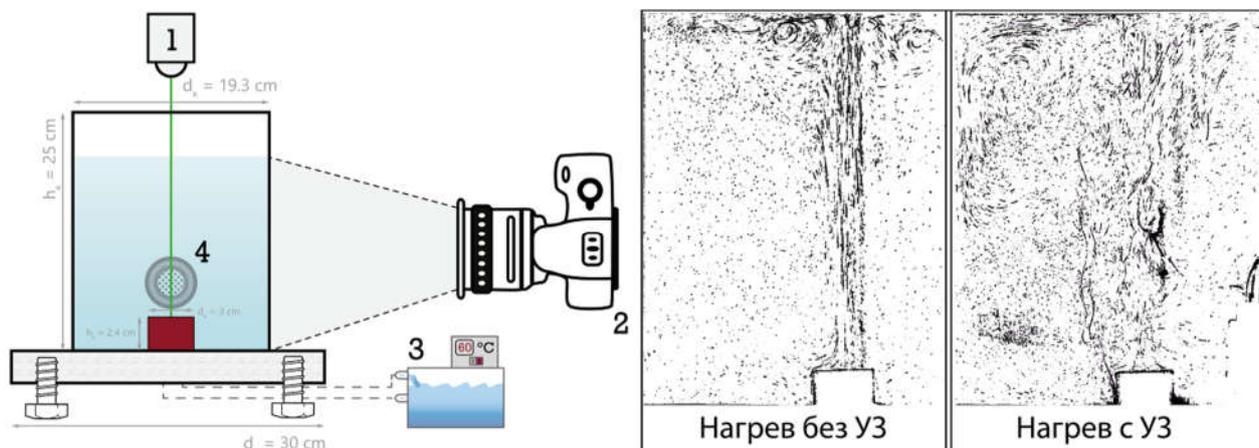


Рис. Схема экспериментальной установки и визуализация возникающего течения.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90138.

1. Sboev I., Kuchinskiy M. An investigation of some structure characteristics of a starting plume at the initial stage of its formation near a heated plate of finite dimensions //AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2020. T. 2216. №. 1. С. 040016.

2. Lappa M. Some considerations about the symmetry and evolution of chaotic Rayleigh–Benard convection: The flywheel mechanism and the “wind” of turbulence // Comptes Rendus Mecanique. 2011. Vol. 339, no. 9. P. 563–572.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ФУНКЦИЙ СОСУДИСТЫХ АНАСТОМОЗОВ МЕТОДАМИ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА

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

Несмотря на то, обходные сосудистые анастомозы получили широкое применение в современной клинической практике, вопрос об оптимальном соединении сосуда-донора с сосудом-реципиентом остаётся открытым. В настоящее время существуют различные задачи оптимизации формирования анастомозов: оптимизация размера артериометрического окна, формы разреза сосуда-донора, нахождение оптимального места и угла соединения двух сосудов и другие. Ранее нами уже был исследован вопрос о нахождении оптимального угла формирования обходных анастомоз [1], однако параметры подбирались вручную, что существенно сокращало область поиска, а также увеличивало его время. В данном исследовании для оптимизации формирования сосудистых анастомозов, в частности, для поиска оптимального места соединения двух сосудов, используются методы роевого интеллекта.

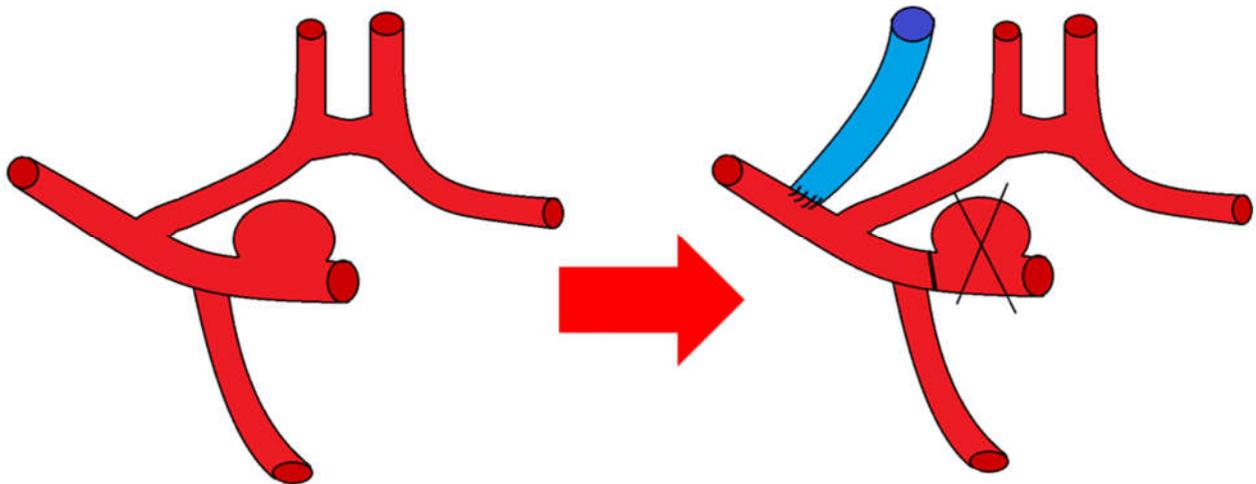


Рис. Модель формирования сосудистого анастомоза при перекрытии внутренней сонной артерии с аневризмой.

Роевой интеллект - это коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы, характеризующейся тем, что некоторые простые правила взаимодействия между её отдельными агентами приводят к возникновению интеллектуального группового поведения. Данные методы оптимизации, несмотря на своё относительно недавнее появление, успели зарекомендовать себя как высокоэффективные по сравнению с такими методами, как, например, метод Гаусса [2]. В данном исследовании применяется как метод роя частиц, так и его гибридный вариант, демонстрирующий свою особую эффективность [3].

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации (проект № 14.W03.31.0002).

1. Iu. O. Kuyanovа., 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, T. 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.

3. J. Ding, Q. Wang, Q. Zhang, Q. Ye, Y. Ma. A Hybrid Particle Swarm Optimization-Cuckoo Search Algorithm and Its Engineering Applications // Mathematical Problems in Engineering, 2019, Article ID 5213759, <https://doi.org/10.1155/2019/5213759>.

РЕЗОНАНСЫ ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ

О.А. Логвинов

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

В работе рассматриваются течения вязкоупругой жидкости между двумя параллельными пластинами на малом расстоянии друг от друга – так называемые течения в ячейке Хеле-Шоу. Вязкоупругие свойства описываются моделью Максвелла с верхней конвективной производной. Модель характеризуется двумя постоянными параметрами: сдвиговой вязкостью и временем релаксации напряжений. Осреднением общей трёхмерной модели по координате, перпендикулярной пластинам ячейки Хеле-Шоу, получается двумерная модель фильтрации жидкости Максвелла. Частными случаями полученных уравнений являются уравнения Дарси и Бринкмана с учётом времени релаксации [1]. При времени релаксации, стремящемся нулю, уравнения фильтрации жидкости Максвелла переходят в обычные уравнения Бринкмана для ньютоновской жидкости [2].

Изучается вытеснение вязкоупругой жидкости из ячейки Хеле-Шоу. На Рисунке приведён результат эксперимента по радиальному вытеснению водной суспензии коллоидных частиц глины водой (чёрный цвет, [3]). Суспензия демонстрировала весь спектр неньютоновских свойств: псевдопластичность, вязкоупругость, наличие предела текучести. Вода поступала через отверстие в центре. Заметно, что, помимо классических вязких пальцев, также могут расти тонкие упругие трещины.

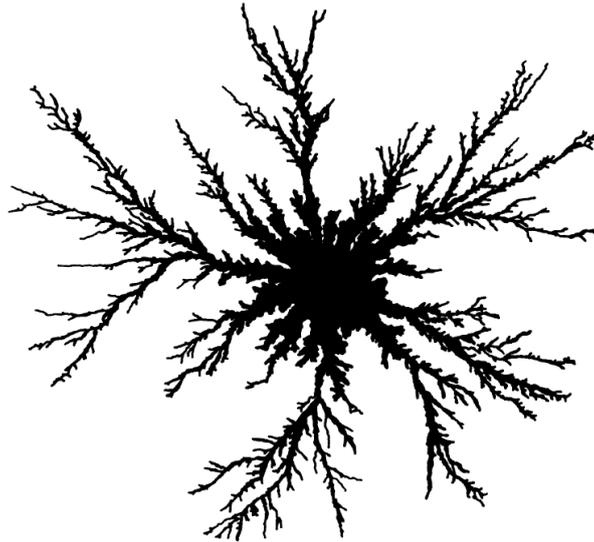


Рис. Радиальное вытеснение водной суспензии коллоидных частиц глины водой (чёрный цвет).

В работе проведён линейный анализ устойчивости плоского фронта вытеснения вязкоупругой жидкости другой вязкоупругой жидкостью. Важная особенность исследования – отсутствие в системе стабилизирующего фактора – поверхностного натяжения. В его отсутствие, характерный размер неустойчивости определяется вязкими нормальными напряжениями: классическое динамическое условие равенства давлений на межфазной границе заменяется более общим равенством нормальных напряжений. Линейный анализ показал, что при определённом соотношении времён релаксации возможен «резонанс» – резкое увеличение темпа роста малого возмущения на фронте вытеснения. Это увеличение может приводить к образованию упругих трещин.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант №20-07-00378 А.

1. Gorodtsov V. A., Yentov V. M. Instability of the displacement fronts of non-Newtonian fluids in a Hele-Shaw cell, *J. Appl. Math. Mech.* 1997. 61, №1. 111–126.

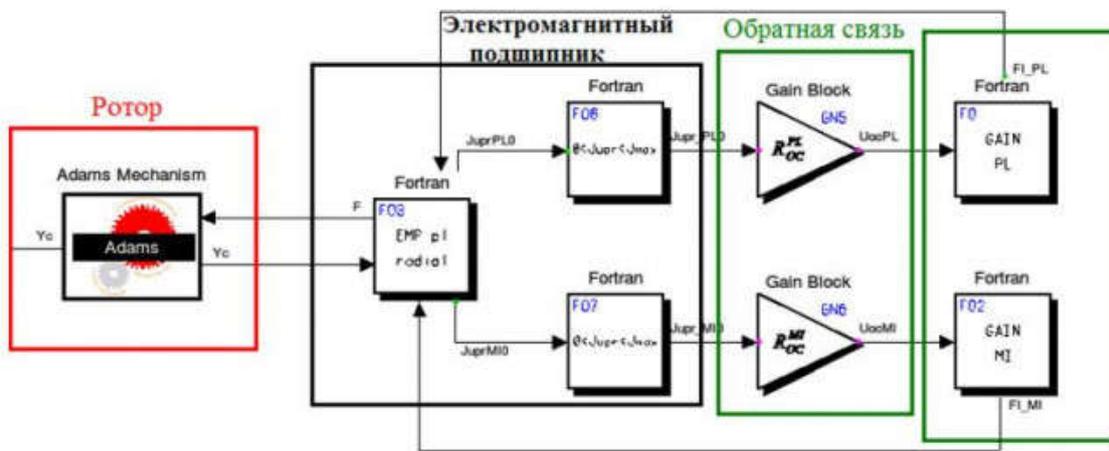
2. Logvinov O. A. Radial viscous fingering in case of poorly miscible fluids // *Trans. Por. Media.* 2018. 124, №2. 495–508.

3. Van Damme H., Laroche C., Gatineau L. Radial fingering in viscoelastic media, an experimental study // *Rev. Phys. Appl.* 1987. 22. 241–252.

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 связанного 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.

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, NO. 4. P.147-151.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВСКИПАНИЯ И ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЛИ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

В.О. Майоров^{1,2}, А.К. Ястребов², В.Ю. Левашов^{1,2}, А.А. Сидоров²

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

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: mayorovvo@imec.msu.ru

В работе проводится численное исследование вскипания и фрагментации капель перегретой жидкости. В таком состоянии температура жидкости выше температуры насыщения при ее давлении, поэтому в объеме такой капли могут вследствие случайных флуктуаций образовываться микроскопические паровые пузыри. Если размер пузыря больше критического радиуса, то он может расти, в противном случае он мгновенно схлопывается. Рост числа паровых полостей и увеличение их объема может приводить к фрагментации капель жидкости. Изучение этих процессов имеет значение как для фундаментальной науки, так и для ряда технических приложений. Например, такие процессы могут происходить при впрыске криогенного топлива в камеру сгорания силовой установки космического аппарата.

В качестве начального этапа исследования описанных выше процессов в работе рассматривается вскипание и фрагментация одиночной капли перегретой жидкости, находящейся в неограниченной области, заполненной насыщенным паром. В начальный момент времени капля имеет следующие параметры: радиус R_0 и степень перегрева S , которая выражается как отношение давления насыщения при температуре капли к давлению окружающей среды. В такой постановке реализуются следующие процессы: испарение жидкости с поверхности капли, образование и последующий рост паровых пузырей в объеме капли.

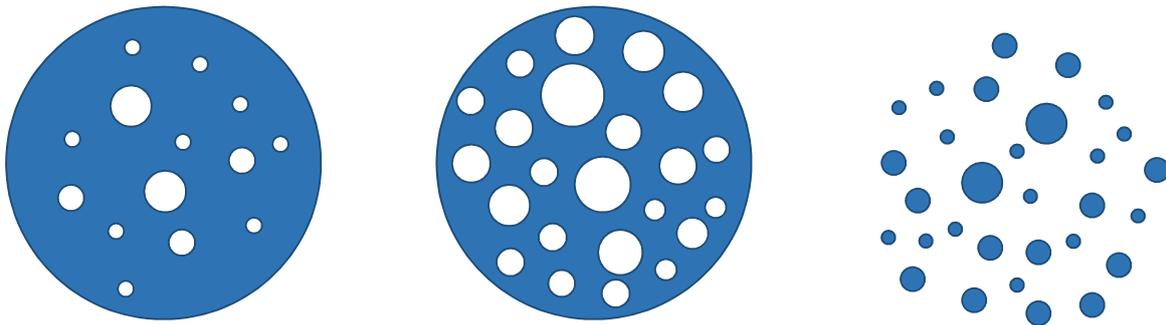


Рис. 1. Процесс вскипания и фрагментации капли перегретой жидкости.

Математическое описание включает в себя уравнения баланса массы и энергии для капли, а также уравнение идеального газа для паровой фазы. Для описания кинетики объемного вскипания перегретой жидкости используется кинетическое уравнение для функции распределения паровых пузырей по размерам и кинетическое уравнение для нее. Такой подход успешно использовался авторами для моделирования объемной конденсации пересыщенного пара [1]. Скорость образования зародышей паровой фазы описывается согласно классической теории нуклеации [2], а динамика их роста – тепловой энергетической схеме [3]. Массовый и тепловой поток на внешней границе капли вычисляется по соотношениям, полученным методами физической кинетики для свободно молекулярного предела.

В работе предложен критерий разрушения капли перегретой жидкости, основанный на оценке критической объемной доли паровых пузырей и подход, позволяющий определить число и средний размер капель, которые образуются в результате фрагментации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-38-90247).

1. Mayorov V.O., Yastrebov A.K. Numerical study of bulk condensation in laminar flow diffusion chamber // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 891. 012129.

2. Зельдович Я Б К теории образования новой фазы. Кавитация // ЖЭТФ. 1940 Т. 12, №11/12. С.525.

3. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов – М.: Издательство МЭИ, 2000. 374 с.

ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИНОРОДНОМ ВДУВЕ

М.С. Макарова, В.Г. Луцкич

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: makarova@imec.msu.ru

В результате проведенного авторами ранее численного исследования ламинарного сжимаемого пограничного слоя на проницаемой пластине с вдувом газа с постоянным числом Прандтля $Pr=0.3$ обнаружен новый эффект – существование области температур проницаемой стенки ниже температуры вдуваемого газа [1]. При этом максимальная разность температур вдуваемого газа T_j и стенки T_w достигается при значении температуры вдуваемого газа ниже температуры адиабатной непроницаемой стенки T_{aw0} [2]. Подобный эффект обнаружен и при однородном вдуве ($Pr=const$) в сверхзвуковой турбулентный пограничный слой [3]. Представляет интерес исследовать влияние на разность температур переменности числа Прандтля, которая может быть реализована путем вдува инородного газа. Для этого в настоящей работе были проведены расчеты вдува гелия в сверхзвуковой ламинарный и турбулентный поток ксенона (см. рис.). При этом диапазон изменения чисел Прандтля для смесей He-Xe в пограничном слое составлял $Pr=0.18\div 0.67$.

Расчет течения и теплообмена в сжимаемом пограничном слое на проницаемой пластине был проведен с использованием системы уравнений неразрывности, движения, энергии и бинарной диффузии газов. В расчетах пластина обтекалась сверхзвуковым потоком газа (Xe) с постоянной скоростью при числе Маха $M=3$ и температуре торможения 400 К. Для случая турбулентного течения система уравнений замыкалась трехпараметрической моделью сдвиговой турбулентности [4] в постановке [5].

При температуре вдуваемого газа (He), равной температуре адиабатной непроницаемой стенки $T_j=T_{aw0}$, достигается максимальная разность между температурой стенки и температурой вдуваемого газа $T_j - T_w$. Для газовой смеси He(5%)-Xe(95%) с постоянным числом $Pr=0.18$ величина $\Delta T=1 - T_w/T_{aw0}$ не превосходит 4.5% при изменении на порядок величины относительной интенсивности вдува гелия j_w , в то время как при вдуве He в Xe, когда число Прандтля газовой смеси на стенке Pr_w переменное, величина ΔT достигает 12% при слабом вдуве ($j_w=0.00001$) и немного уменьшается с ростом j_w . Для турбулентного пограничного слоя получены аналогичные результаты по влиянию переменности числа Pr на разность температур стенки и вдуваемого газа, но в значительно меньшей степени, чем для ламинарного.

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

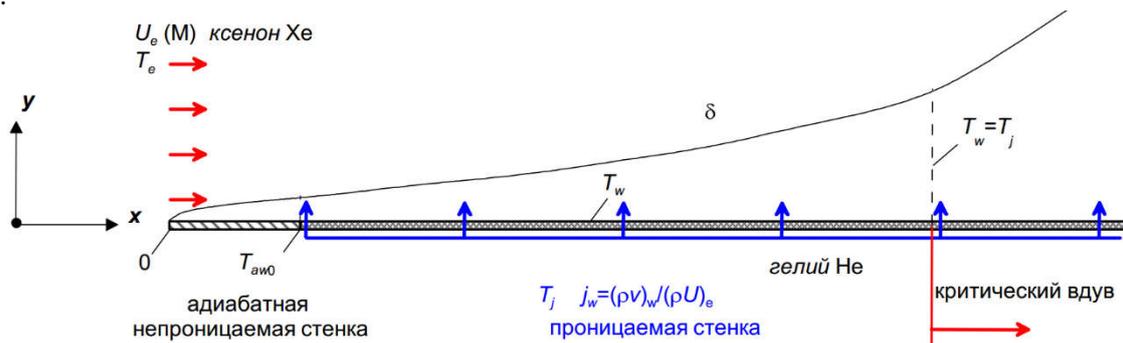


Рис. Схема течения.

1. Леонтьев А.И., Луцкич В.Г., Макарова М.С. Особенности теплообмена на проницаемой поверхности в потоке сжимаемого газа // ДАН, 2018. Т. 482. № 1. С. 38-41.
2. Леонтьев А.И., Луцкич В.Г., Макарова М.С. Коэффициент восстановления температуры в пограничном слое на проницаемой пластине // ТВТ, 2017. Т.55. №2. С. 255–261.
3. 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 $Pr<1$ // Int. J. Heat Mass Transf., 2020. 118959.
4. Луцкич В.Г., Макарова М.С., Якубенко А.И. Применение трехпараметрической модели сдвиговой турбулентности для решения задач внешнего обтекания поверхностей потоком сжимаемого газа // Программная инженерия, 2017. Т.8. №12. С. 563-574.
5. Макарова М.С. Оптимизация температуры проницаемой стенки при вдуве инородного газа // Тепловые процессы в технике, 2012. Т. 4. №7. С. 291-296.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ ГАЗОВ В ТРУБЕ С СИЛЬНЫМ НАГРЕВОМ СТЕНОК

М.С. Макарова, В.Г. Луцкич

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: makarova@imec.msu.ru

С использованием дифференциальной модели турбулентности [1] проведено численное исследование теплообмена при течении гелий-ксеноновой смеси газов с молекулярным числом Прандтля $Pr=0.23$ в обогреваемой трубе малого диаметра при сильном подогреве теплоносителя в широком диапазоне параметров течения и теплообмена (тепловой поток в стенку: $q_w=0.35, 1.66, 3.66$ Вт/м²; давление на входе в трубу: $p=0.5, 1.0, 2.0$ атм; входное число Рейнольдса: $Re=3 \cdot 10^3 \div 8 \cdot 10^4$), соответствующих эксперименту [2]. Полученные результаты расчетов по зависимости коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта от числа Рейнольдса (см. рис.) зависят от определения температуры потока и согласуются с экспериментальными данными [2].

Проведено исследование зависимости числа Нуссельта от характерной температуры, в качестве которой использованы среднемассовые температуры: термодинамическая, торможения и восстановления. Показано, что определенные по этим температурам числа Нуссельта существенно различаются. Это различие обусловлено влиянием сжимаемости за счет роста числа Маха при ускорении потока и значительном нагреве газа, сопровождающимся существенным изменением теплофизических свойств газа и ростом отрицательного градиента давления. Отмечено, что число Нуссельта, определенное по среднемассовой температуре восстановления ближе всего к одной из широко используемых в инженерной практике зависимостей $Nu(Re, Pr)$ для теплоносителей с постоянными физическими свойствами - эмпирической формуле Б.С. Петухова.

Проведенный анализ интегральных и локальных характеристик течения и теплообмена показал, что появляющийся при нагреве газа существенный отрицательный градиент давления способствует ламинаризации течения, что подтверждается уменьшением коэффициента трения и вырождением характеристик турбулентности. Турбулентное число Прандтля Pr_t при этом, оставаясь примерно постоянным ($Pr_t \sim 0.9-1$) к середине участка обогрева, на выходе возрастает в основной части потока и уменьшается в пристеночной области. Полученное в расчетах значение величины коэффициента аналогии Рейнольдса K_{Re} зависит от определения величины числа Нуссельта и существенно выше единицы, что свидетельствует о преобладании процессов теплообмена над трением, характерном для газов с малым числом Прандтля.

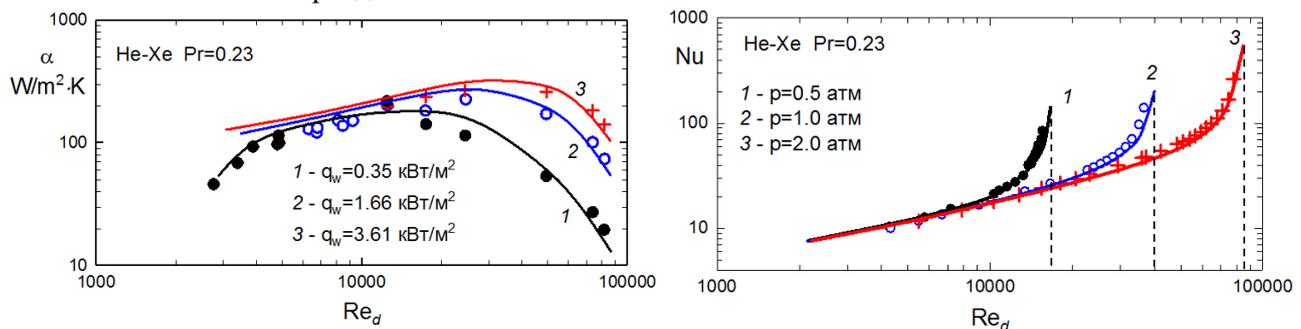


Рис. Изменение коэффициента теплоотдачи α и числа Нуссельта Nu в зависимости от числа Рейнольдса Re_d : точки - экспериментальные данные [2], линии - результаты расчета. Поведение кривых зависит от выбора характерной температуры (для вычисления α использована среднемассовая термодинамическая температура потока на выходе из участка \bar{T} , для числа Нуссельта - среднемассовая температура торможения \bar{T}^* в зависимости от числа Рейнольдса).

Работа поддержана Российским научным фондом (проект №19-79-10213).

1. Леонтьев А.И., Луцкич В.Г., Макарова М.С. Численное исследование течения в трубе с отсосом газа через проницаемые стенки // Изв. РАН. МЖГ, 2014. №3. С. 74-81.

2. O. V. Vitovsky, M.S. Makarov, V.E. Nakoryakov, V.S. Naumkin. Heat transfer in a small diameter tube at high Reynolds number // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 109. P. 997-1003.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ МНОГОКРАТНОГО МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ

А.Н. Максимов^{1,2}

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

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

e-mail: andmax@imec.msu.ru

В работе исследуется структура автомодельного течения при отрицательном маховском отражении ударных волн от клина - когда падающая и отраженная ударные волны расположены по разные стороны от прямолинейной траектории движения тройной точки [1]. Такие режимы для умеренных значений числа Маха реализуются в газах с показателем адиабаты, близким к единице (в экспериментах – для тяжелых газов со сложной молекулярной структурой).

Численное моделирование в рамках уравнений Эйлера для нестационарных двумерных течений идеального газа выполнено с использованием TVD модификации явной конечно-разностной схемы с использованием сквозного метода расчета газодинамических разрывов. Для аналитического исследования полученного численного решения применены метод замороженной системы координат, связанной с набегающей ударной волной (автомодельное поле скоростей) [2], который позволяет построить линии тока в каждой точке пространства и метод ударных поляр.

Изучено поведение маховских конфигураций при приближении к критическому значению угла клина в области перехода к регулярному отражению. Исследовано влияние различных неоднородностей и препятствий вблизи поверхности клина на устойчивость режима многократного маховского отражения.

Работа выполнена под руководством П.Ю. Георгиевского при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-01-00793-а).

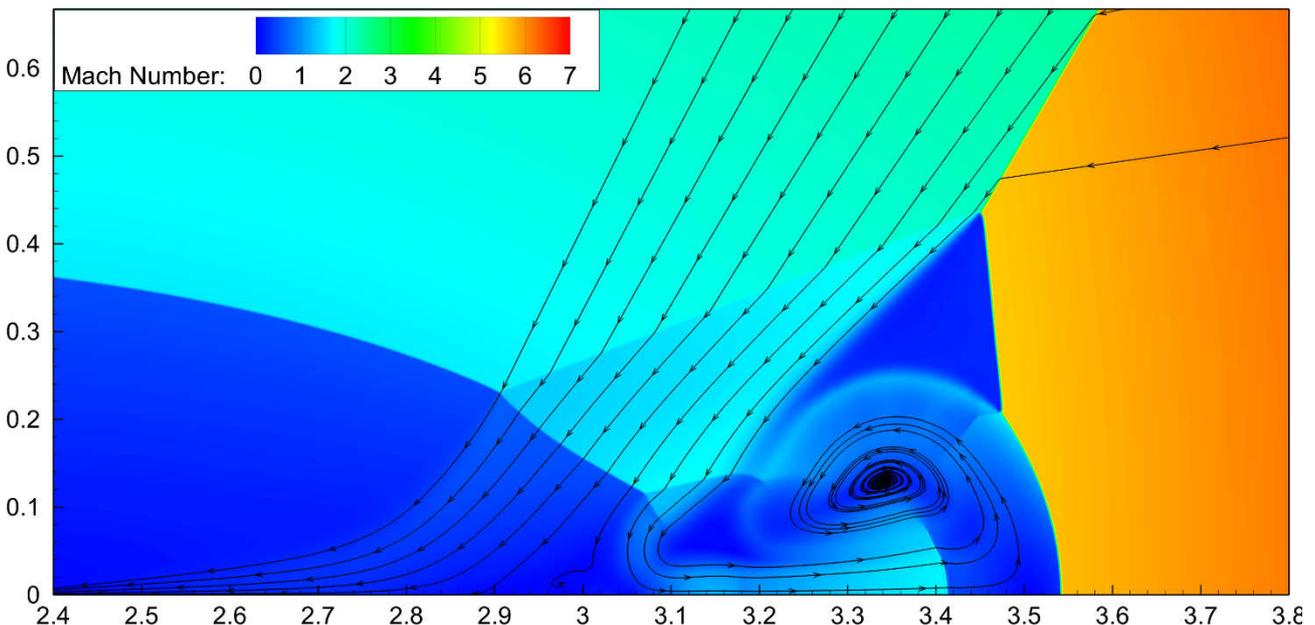


Рис. 1. Линии тока в автомодельном поле скоростей для многократного маховского отражения.

1. Сильников М.В., Чернышов М.В., Гвоздева Л.Г. Аналитическое описание области существования тройных конфигураций с отрицательным углом наклона отраженного скачка // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 11. С. 30–34.

2. Henderson L.F., Vasilev E.I., Ben-Dor G., Elperin T. The wall-jetting effect in Mach reflection: theoretical consideration and numerical investigation // Journal of Fluid Mechanics, 2003, 479: 259-286.

3. Георгиевский П.Ю., Максимов А.Н. Новые режимы отрицательного маховского отражения при дифракции ударной волны на клине // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т. 2: Механика жидкости и газа. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С.331-333.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА У ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Е.А. Малиновская

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

e-mail: elen_am@inbox.ru

Эмиссия частиц микронного и субмикронного размера связывается с наличием потока сальтирующих частиц [1], усиливается с увеличением высоты эффективной шероховатости [2], имеет кубическую зависимость от динамической скорости [3]. Другой механизм выноса связан с возникновением тепловых конвективных потоков над поверхностью [4]. Соотношение доли падающих частиц к частицам, выносимым с поверхности, возрастает при движении вверх по наветренному склону дюны [5, 6]. Это позволяет сделать вывод о преобладании вертикального механизма выноса частиц над сальтационным (ударным).

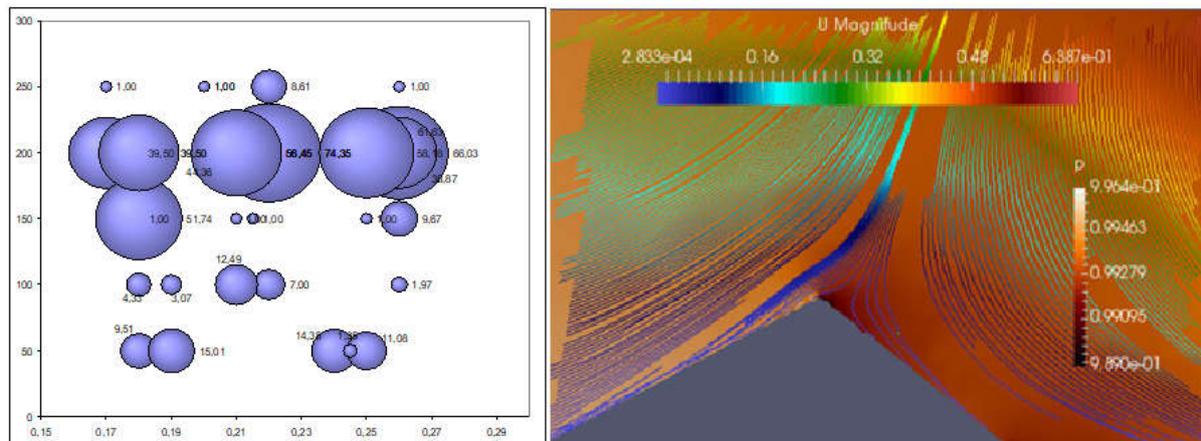


Рис. Сила разности давления при изменении расстояния между поверхностями частиц (слева) и восходящий поток от эоловой структуры (справа).

Рассмотрено обтекание микроряби высотой 0,1-1 мм при скоростях воздушного потока до 4 м/с на высоте 1-2 см с использованием открытого пакета LES model in openFOAM. Добавление на шероховатую поверхность обтекаемой эоловой структуры борозд у вершины приводит к смещению точки отрыва восходящих потоков, к изменению протяженности зоны рециркуляции и временных интервалов струйного усиления ветра у вершины, которое наблюдалось в частности в [7]. Эксперимента с добавлением борозды добавлены с учетом численных исследований для обтекания отдельных частиц для области 5x5x2 мм при скорости воздушного потока на верхней границе 2,8 м/с, выбираемой в соответствии с данными экспериментов в ветровом канале [7]. В зависимости от расстояния между частицами меняются выталкивающая сила, действующая со стороны воздушного потока, критическая скорость и начальные скорости вылета частицы. Как следствие, появляются области с различной вероятностью ветрового выноса, за счет чего, в частности, возникает эоловая рябь.

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

1. Houser C. A., Nickling W. G. *Sedimentology*. 2001. 48(2). 255-267.
2. Martin R.L., Kok J.F. *J. Geophys. Res.* 2018. 123(7). 1546-1565.
3. Shao Y., Raupach M. R., Findlater P. A. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1993. – Т. 98. – №. D7. – С. 12719-12726.
4. 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.
5. Malinovskaya E.A. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* 2019. 55(2). 86-92.
6. Neuman C.M.K et al. *Sediment*. 2000. 47(1). 211-226.
7. Semenov O.E. *Introduction to experimental meteorology and climatology of the sand storms*. Almaty. 2011. p 580 (in Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО ПЕРЕНОСА В КАНАЛАХ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ У ПОВЕРХНОСТИ И ВЕТРОВОЙ ВЫНОС

Е.А.Малиновская¹, Д.Р.Малиновский²

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

²ФГБОУ ВО СтГАУ, Ставрополь

e-mail: elen_am@inbox.ru¹, keup.kupupukp@yandex.ru²

Взаимодействие сред с различной динамикой движения рассматривается в рамках ветрового выноса частиц поверхности эолового происхождения.

Крупные частицы размерами от 30 до 300 мкм подсакаивают над поверхностью до высоты около 20 см (сальтации), мелкие частицы микронового и субмикронового уровня поднимаются до высоты тысяч метров. Эти два различных типа движения связаны между собой [1]. Изменение концентраций микрочастиц связано с изменениями температуры поверхности и воздуха [2]. Поэтому необходимо изучение взаимодействий на микро-уровне в каналах пористой сыпучей среды.

Для масштабов порядка долей и десятков микрометров проведение натуральных экспериментов затруднено. В вычислительном эксперименте исследовалось влияние изменений температуры поверхности и скорости горизонтального потока над поверхностью на движение в пористой среде.

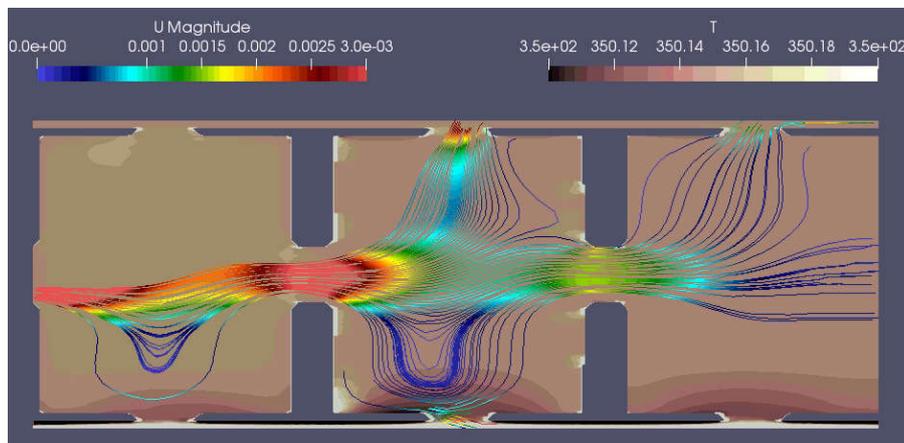


Рис. Поток в воздушном канале между частицами поверхности.

Область, повторяющая форму воздушного канала между частицами поверхности одного размера при прямоугольной укладке, построена с использованием моделирования 3D-объектов.

В качестве граничных условий при численном моделировании микропроцессов в воздушных каналах между частицами на поверхности приняты следующие: температура поверхности меняли от 310° до 350° К с шагом в 10°, скорость воздушного потока на верхней границе – от 0,01 до 0,05 м/с с шагом 0,01 м/с.

Вычислительный эксперимент реализован с использованием OPEN FOAM для ламинарной модели, учитывающей теплоперенос (рисунок). Величина составляющей скорости U_z восходящего потока в области взаимодействия модельной области канала с верхним потоком возрастает с увеличением температуры от 0,002 м/с до 0,0026 м/с, что определяет механизм микроконвекции у поверхности. В нижней области под слоем частиц составляющая скорости U_z отрицательна и скачком возрастает по модулю при температуре выше 330 К, что способствует отрыву от поверхности крупных сальтирующих частиц и выносу из пор частиц микронового и субмикронового размера.

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

1. Houser C. A., Nickling W. G. Sedimentology. 2001. 48(2). 255-267.
2. Chkhetiani O. G. et al. Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. 12(11). 5147.

КОНЦЕНТРАЦИИ N-АЦЕТИЛАСПАРТИЛГЛУТАМАТА И N-АЦЕТИЛАСПАРТАТА В МОЗГЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ АКТИВАЦИИ ПО ДАННЫМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.В. Манжурцев^{1,2,3}, П.Е. Меньшиков², М.В. Ублинский^{1,2}, А.Н. Яковлев^{1,2,4}

¹ НИИ Неотложной Детской Хирургии и Травматологии ДЗМ, Москва

² Институт Биохимической Физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

³ Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва

⁴ Федеральный Исследовательский Центр Химической Физики РАН, Москва

e-mail: andrey.man.93@gmail.com

В последнее десятилетие возник большой интерес к изучению участия N-ацетиласпартата (NAA) в нейронной активации [1, 2]. Ряд работ с использованием магнитно-резонансной (МР) спектроскопии в поле 3 Тесла сообщали о снижении NAA и сопутствующем росте N-ацетиласпартилглутамата (NAAG) в активированной коре мозга человека [3, 4]. Цель настоящего исследования – получить отдельные сигналы NAA и NAAG в покое и при постоянной зрительной активации с помощью МР томографа 3 Тесла. В исследовании приняли участие четырнадцать здоровых испытуемых в возрасте от 20 до 29 лет. За томографом располагался монитор, в который испытуемые смотрели с помощью системы зеркал. В зрительную кору размещали спектроскопический воксель размером 20x40x30 мм. Спектры NAAG и NAA получали с помощью импульсной последовательности MEGA-PRESS с параметрами, определенными в [5]. Определяли интегралы сигналов NAA, NAAG и лактата (Lac) в усредненных по всем испытуемым спектрах покоя и активации. Интеграл шума выступил в роли погрешности измерений.

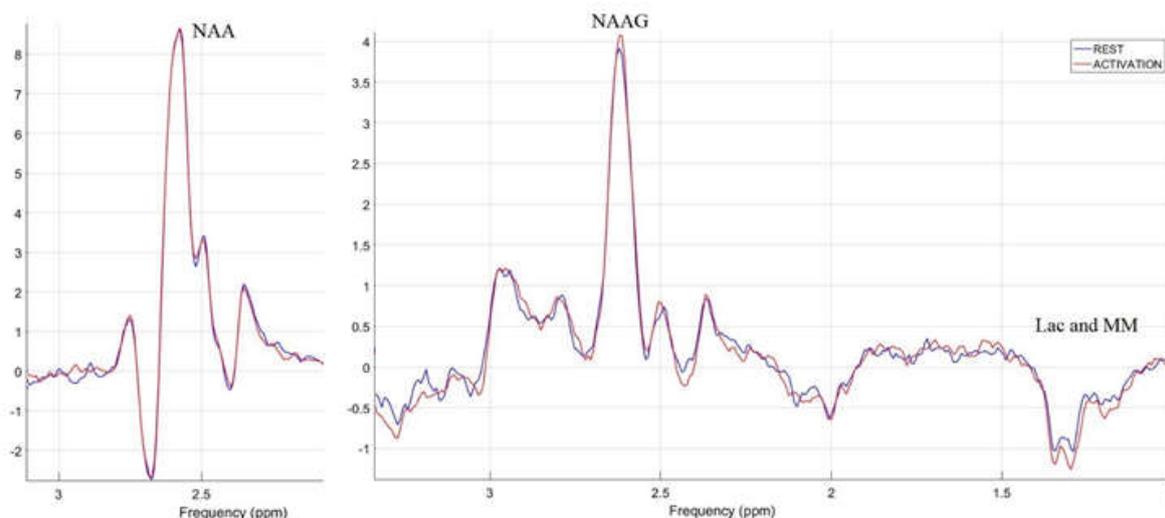


Рис 1. Усредненные спектры NAA и NAAG зрительной коры. Покой – синий, активация – красный.

На рис 1. представлены спектры NAA (слева) и NAAG (справа). Сигналы NAA и NAAG в покое (синий) и при активации (красный) практически идентичны. Интеграл NAA составил $(2.12 \pm 0.15) \cdot 10^{-5}$ отн.ед. в обоих случаях. Интеграл NAAG составил $(4.31 \pm 0.26) \cdot 10^{-6}$ в покое и $(4.48 \pm 0.29) \cdot 10^{-6}$ при активации. Наблюдается увеличение сигнала Lac: от $(1.47 \pm 0.21) \cdot 10^{-6}$ в покое до $(1.89 \pm 0.19) \cdot 10^{-6}$ при видеостимуляции. Результаты исследования свидетельствуют о постоянстве NAA и NAAG в зрительной коре при постоянной видеостимуляции. Это означает принципиальную невовлеченность этих метаболитов в процесс передачи нейронного возбуждения, что опровергает результаты работы [3]. Наблюдаемый рост Lac подтверждает факт работы зрительной коры и согласуется с большинством литературных данных.

1. Манжурцев и др. Известия АН. Сер. Хим. 2016. №6, 1630-1636
2. Mangia, S., Tkac, I. Letter to the Editor. J Mol Neurosci 35, 245–246 (2008).
3. Castellano G, Li LM Braz J Med Biol Res. 2012; 45:1031–6.
4. Magn Reson Imaging. 2016 April; 34(3): 239–245. doi:10.1016/j.mri.2015.10.038.
5. R.A.E. Edden, M.G. Pomper, P.B. Barker. Magnetic Resonance in Medicine 57:977–982 (2007).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА РОТОРА САВОНИУСА

А.А. Мастерова

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: masterovaanya@yandex.ru

В рамках данного исследования был создан лабораторный макет ротора Савониуса. Прототип изучали в аэродинамической трубе НИИ механики МГУ при малых скоростях набегающего потока. Замерялись силы, действующие на ротор, и аэродинамический момент. В процессе эксперимента изменялись значения скорости набегающего потока и угловой скорости вращения ротора (в том числе исследовалось вращение в обратную сторону).

На базе полученных данных предложена модификация модели воздействия потока на ротор типа Савониуса, описанная в работах [1-3]. В рамках такой модели безразмерный коэффициент аэродинамического момента раскладывается в ряд Фурье. Получена зависимость коэффициентов ряда от безразмерной угловой скорости.

Такая модель позволяет существенно упростить проведение параметрического анализа для сложных механических систем, имеющих в своем составе ротор Савониуса. Это достигается благодаря расширению методов, применимых для решения такого рода задач за счет средств теоретической механики. Далее результаты можно уточнить с помощью классических методов теории сплошных сред, дающих более точное количественное совпадение, но слишком ресурсоемких для анализа динамики в широкой области параметров.

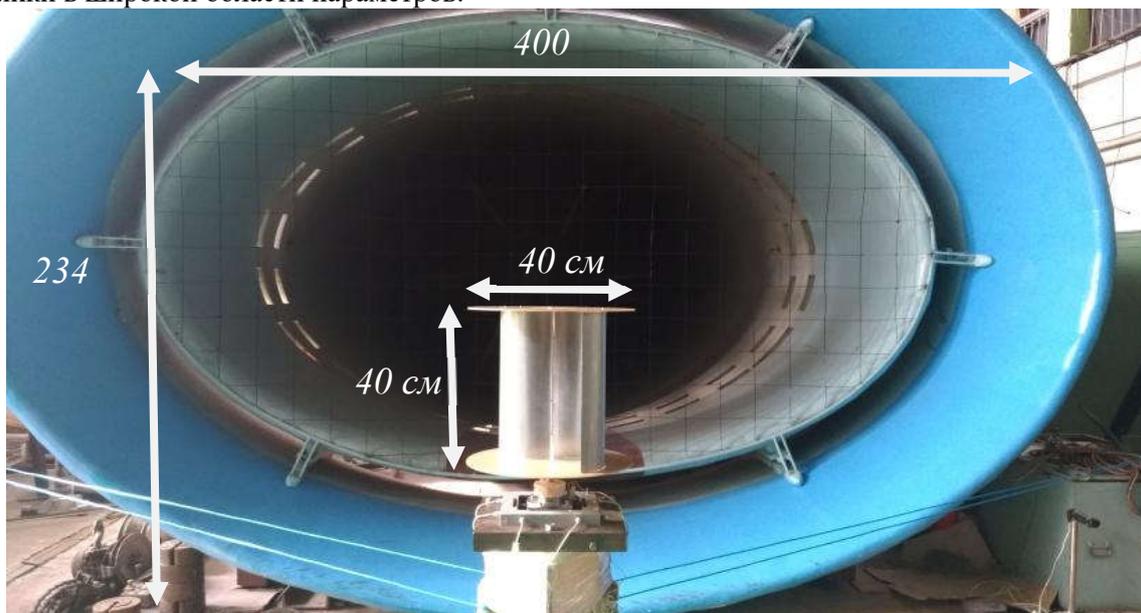


Рис. Экспериментальная установка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-31-99973.

1. Мастерова А.А. Моделирование динамики малогабаритной ветроэнергетической установки на базе ротора Савониуса/ Труды конференции-конкурса молодых ученых. 13-17 октября 2017 г. / М.: Издательство Московского университета, 2018. С. 140-147.

2. Мастерова А.А. Моделирование динамики колесной тележки, приводимой в движение с помощью ротора Савониуса/ Труды конференции-конкурса молодых ученых. 15-17 октября 2018 г. / М.: Издательство Московского университета, 2019. С. 98-105.

3. Мастерова А.А. Эмпирический подход к описанию воздействия потока на ротор Савониуса/ Тезисы конференции-конкурса молодых ученых Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова 21-25 октября 2019 г. с. 21.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩИЕ РОТОР САВОНИУСА

А.А. Мастерова

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

e-mail: masterovaanya@yandex.ru

В работах [1-3] предложен феноменологический метод описания аэродинамических сил и моментов, действующих на ротор Савониуса в воздушном потоке. Данный метод позволяет описать аэродинамическое воздействие потока на ротор в виде функциональной зависимости сил и моментов от мгновенных значений обобщенных координат и скоростей, а также параметров систем, содержащих в своем составе ротор Савониуса. Как следствие такой подход дает возможность исследовать сложные механические системы, используя малопараметрические модели.

На основе упомянутого метода в данной работе исследуется динамика механической и электромеханической систем, в состав которых входит рассматриваемый тип ротора. А именно, построены математические модели ветроэнергетической установки на базе ротора Савониуса и ветродвижителя с ротором Савониуса. В первом случае энергия ветра преобразуется в электроэнергию, во втором – в полезную работу – движение ветромобиля, а ротор всегда выступает в качестве ветроприемного элемента. Описаны характеристики установившихся режимов движения и переходных процессов в зависимости от параметров и начальных условий.

Данное исследование в отличие от работы [4] учитывает зависимость аэродинамического воздействия на ротор и от угловой скорости вращения, и от угла поворота относительно набегающего потока. Обсуждается, какие свойства динамики изучаемых объектов можно уловить, используя не только усредненное значение момента на обороте, как это принято делать в таких случаях.

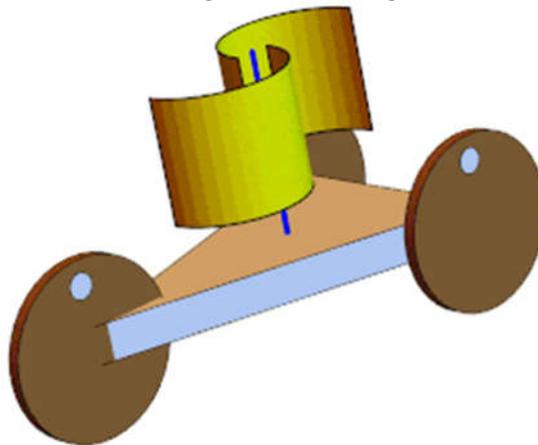


Рис. Ветромобиль на базе ротора Савониуса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-31-99973.

1. Мастерова А.А. Моделирование динамики малогабаритной ветроэнергетической установки на базе ротора Савониуса/ Труды конференции-конкурса молодых ученых. 13-17 октября 2017 г. / М.: Издательство Московского университета, 2018. С. 140-147.

2. Мастерова А.А. Моделирование динамики колесной тележки, приводимой в движение с помощью ротора Савониуса/ Труды конференции-конкурса молодых ученых. 15-17 октября 2018 г. / М.: Издательство Московского университета, 2019. С. 98-105.

3. Мастерова А.А. Эмпирический подход к описанию воздействия потока на ротор Савониуса/ Тезисы конференции-конкурса молодых ученых Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова 21-25 октября 2019 г. с. 21.

4. Мастерова А.А. Динамика колесной тележки с ротором Савониуса / Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2018. Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2018 г., Сочи, «Буревестник» МГУ) / М.: Издательство Московского университета, 2018. С. 116.

АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗАДАЧАХ КАЧЕНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ С ВЯЗКОУПРУГИМ СЛОЕМ

А.Р. Мещерякова

ИПМех РАН им. Ишлинского, Москва

e-mail: mif-almira@yandex.ru

Рассматривается задача качения упругой сферы по упругому полупространству, покрытому вязкоупругим слоем в квазистатической постановке. Упругие постоянные сферы и полупространства считаются одинаковыми. Податливость слоя в нормальном и касательном направлениях описывается моделью Максвелла. Схема качения сферы показана на рисунке 1.

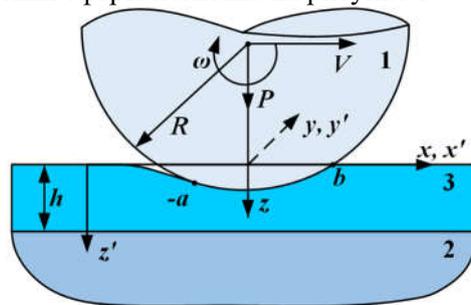


Рисунок 1. Схема качения упругой сферы по упругому полупространству, покрытому вязкоупругим слоем.

Для нахождения нормального напряжения в области контакта применяется численно-аналитический метод на основе метода полос [1]. Область контакта делится на полосы в направлении качения сферы. Для решения интегрального уравнения в каждой полосе используется полученное ранее решение для задачи качения упругого цилиндра по упругой плоскости, покрытой вязкоупругим слоем [2].

При качении область контакта состоит из зон сцепления и проскальзывания. В зонах проскальзывания касательное и нормальное напряжения связаны друг с другом с помощью закона Кулона. Для определения границ зон сцепления и проскальзывания и касательного напряжения в зоне сцепления используется вариационный метод. Описание метода для решения задачи качения двух упругих тел без промежуточной среды приведено в [3]. Распределение касательного напряжения при качении упругой сферы по упругому полупространству, покрытому вязкоупругим слоем, без учёта податливости промежуточной среды в вертикальном направлении приведены в [4].

Получены распределения нормального и касательного напряжений при качении с проскальзыванием при наличии вязкоупругого слоя. Показано влияние характеристик вязкоупругого слоя, скорости качения и величины относительного проскальзывания на силу трения и расположение зон сцепления и проскальзывания.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ: № 20-01-00400.

1. Haines D.J., Ollerton E. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1963. № 177(1). С. 95–114.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия // Москва: Наука. 2001. С. 480.
3. Гольдштейн Р.В., Зазовский А.Ф., Спектор А.А., Федоренко Р.П. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением // Успехи механики. 1982. Т. 5. № 3/4. С. 61-102.
4. Мещерякова А.Р. Качение сферы по вязкоупругому слою с учётом проскальзывания в продольном и поперечном направлениях // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 18-23 ноября 2019 года. Аэрокосмические технологии. МФТИ, 2019. С. 49.

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ПОРОЖДЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Ю.С. Качанов, Д.А. Мищенко

ИТПМ СО РАН, Новосибирск

e-mail: D.A.Mischenko@itam.nsc.ru

Работа посвящена систематическому экспериментальному исследованию одного из наиболее эффективных механизмов порождения нестационарных (в общем случае) вихрей Гёртлера [1], связанного с распределенным рассеянием низкочастотных и стационарных вихрей набегающего потока на естественной неоднородности нарастающего пограничного слоя. Эксперименты проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости основного потока 9,18 м/с в двумерном пограничном слое типа Блазиуса на вогнутой поверхности высокоточной экспериментальной модели (радиус закругления $R = 8,37$ м). Основные измерения выполнены термоанемометром с использованием метода контролируемых нестационарных возмущений, реализованного за счет применения специальных источников. Прямые экспериментальные результаты получены для вихрей Гёртлера трех частот $f = 8, 13$ и 17 Гц (частотный параметр $F = 9,29; 15,09$ и $19,73$) с поперечными длинами волн $\lambda_z = 7 \div 24$ мм (безразмерный поперечный масштаб $\Lambda = 119 \div 758$) в диапазоне чисел Гёртлера $G^* = 8,6 \div 21,0$.

Обнаружено, что исследуемый механизм распределенной вихревой восприимчивости способен эффективно порождать как стационарные, так и нестационарные вихри Гёртлера, а также существенно модифицировать законы развития нестационарных (по крайней мере) гёртлеровских мод вниз по потоку (рис. 1). Действие механизма способно сильно изменять инкременты возмущений пограничного слоя и обеспечивать как усиление, так и подавление нестационарных гёртлеровских мод. В работе получены оценки количественных характеристик исследуемой задачи – коэффициентов распределенной вихревой восприимчивости. Найдено, что амплитуды и фазы коэффициентов не зависят от продольной координаты (в исследованном диапазоне параметров) и являются постоянными величинами (константами). Амплитуды коэффициентов нарастают (по линейному закону) с ростом частоты возмущений, а также с ростом их поперечного масштаба (особенно в области высоких частот). Оценки коэффициентов при порождении *стационарных* вихрей Гёртлера были получены путем линейной аппроксимации частотной зависимости амплитуд коэффициентов при порождении *нестационарных* гёртлеровских вихрей с последующей экстраполяцией на нулевую частоту. Обнаружено, что ответственный за порождение стационарных мод неустойчивости Гёртлера механизм распределенной вихревой восприимчивости является значительно более слабым, чем в случае порождения нестационарных гёртлеровских вихрей.

Работа поддержана РФФИ (грант № 12-01-31211).

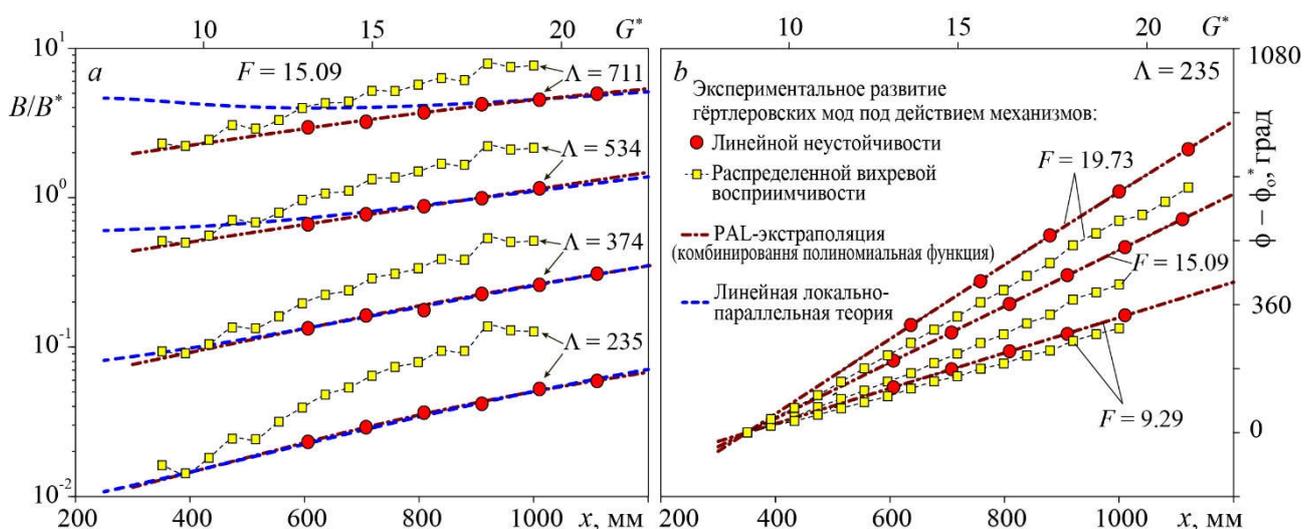


Рис. Сравнение кривых нарастания амплитуд (а) и фаз (б) нестационарных вихрей Гёртлера под действием механизмов линейной неустойчивости и распределенной вихревой восприимчивости пограничного слоя.

1. Boiko A.V., Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A. Steady and unsteady Görtler boundary-layer instability on concave wall // European Journal of Mechanics B/Fluids, 2010, 29, 61-83.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДИСКЕ

Е.И. Могилевский^{1,2}, А.А. Ипатова^{1,3}, К.В. Смирнов¹

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

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

³Institut d'electronique, de microelectronique et de nanotechnologie, Lille, France

e-mail: mogilevskiy@mech.math.msu.su

Гидравлическим прыжком называется резкое изменение толщины слоя жидкости, текущего по твердой поверхности, данное явление соответствует ударной волне при аналогии между течениями тонкого слоя и газовой динамикой. В настоящей работе рассматриваются круговые гидравлические прыжки, которые возникают при растекании вязкой жидкости по горизонтальному диску в радиальном направлении; струя жидкости падает в центр диска с постоянным расходом (см. рис. 1).



Рис. 1. Гидравлический прыжок

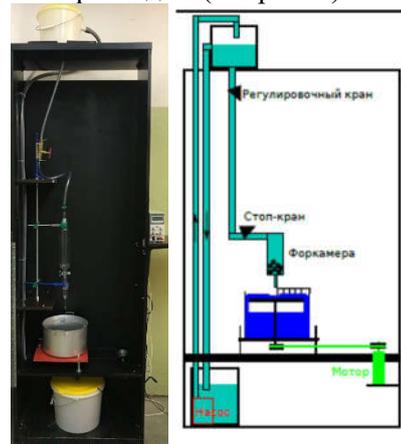


Рис. 2. Фотография и схема установки

Рассматривается задача об определении положения гидравлического прыжка в случае, когда горизонтальная поверхность вращается. Положение прыжка определяется балансом сил инерции, трения и гидростатического давления, вращение передает дополнительные импульсы жидкости за счет центробежной силы и силы Кориолиса.

Теоретическое исследование ограничено случаем стационарного осесимметричного течения. С помощью осреднения уравнений тонкого слоя с учетом вязкости, градиента гидростатического давления, центробежной и Кориолисовой сил получена система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно толщины слоя, радиальной и окружной компоненты скорости. Проведен качественный анализ решений этой системы уравнений, получена классификация режимов течения. Получено, что при увеличении скорости вращения гидравлический прыжок смещается к периферии диска, при этом изменение толщины слоя на прыжке монотонно уменьшается до нуля. При определенной скорости вращения прыжок исчезает и решение, описывающее течение, становится непрерывным. Выявлено четыре качественно различных режима течения, которые различаются наличием и расположением зон докритического течения, где радиальная скорость течения меньше скорости распространения малых возмущений по поверхности жидкости.

Показано, что гидравлический прыжок расположен ближе к оси вращения, чем точка потери устойчивости течения по отношению к малым осесимметричным возмущениям [1].

В НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова построена экспериментальная установка (рис.2) для изучения подобных течений. Получено качественное соответствие между результатами расчетов и экспериментальными данными. Вместе с тем, наряду со стационарными осесимметричными режимами течения обнаружены волновые режимы (стационарные спиральные, осесимметричные капиллярные).

Работа выполнена по госбюджетному плану МГУ при частичной поддержке РФФИ (гранты 18-01-00762, 18-51-00006).

1. Могилевский Е. И., Шкадов В. Я. Течения тонких пленок вязкой жидкости по криволинейным вращающимся поверхностям // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 2. С. 18–32.

ВЛИЯНИЕ ЗНАКА КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ НА СТРУКТУРУ И ИНТЕНСИВНОСТЬ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВОЙНОЙ ДИФфуЗИИ

Е.А. Мошева, А.И. Мизёв

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: mosheva@icmm.ru

В данной работе экспериментально исследован процесс формирования конвективного течения вследствие неустойчивости двойной диффузии [1, 2] в двухслойной системе смешивающихся жидкостей. Течение представляет собой пальчиковую структуру, распространяющуюся в обе стороны от первоначальной границы контакта слоёв. Эксперименты выполнены в вертикальной ячейке Хеле-Шоу высотой – 9.0 см, шириной – 2.4 см, толщиной – 0.1 см. Изначально система имеет устойчивую стратификацию по плотности (верхний слой легче нижнего), а каждая из жидкостей однородна по концентрации. В исследуемой постановке градиенты концентрации растворенных веществ А и В (также как и градиенты плотности) разнонаправлены, а компоненты диффундируют навстречу друг другу (Рис. 1). В качестве рабочих жидкостей использованы водные растворы ряда неорганических и органических соединений. Варьирование веществ позволило проводить исследование в широком диапазоне управляющих параметров. Для визуализации нестационарного распределения концентрации веществ использован лазерный интерферометр Физо. Для визуализации и оценки интенсивности течения использован метод PIV.

Исследованы три возможные конфигурации системы:

- (1) оба вещества имеют положительный знак концентрационной зависимости плотности, т. е. плотность растворителя меньше плотности обоих слоев;
- (2) компоненты имеют разные знаки концентрационной зависимости плотности, т. е. плотность растворителя лежит между значениями плотностей обоих слоев;
- (3) оба компонента имеют отрицательный знак концентрационной зависимости плотности, т. е. плотность растворителя больше плотности обоих слоев.

Особое внимание сосредоточено на изучении конфигураций 2 и 3, которые ранее в литературе не рассматривались. В докладе обсуждается влияние таких управляющих параметров как соотношение коэффициентов диффузии и коэффициентов концентрационного расширения на тип структуры возникающей конвекции, её интенсивность, а также условия перехода к устойчивости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00621) и Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, грант № С-26/788).

1. Turner J. S. Buoyancy effects in fluids. Cambridge, UK: Cambridge university press, 1979. 412 p.

2. Ощепков, В. О., Мошева, Е. А., Мизев, А. И. Неустойчивость двойной диффузии при сонаправленной диффузии растворенных компонент // Вестник Пермского университета. Физика, 2019. № 4. С. 60–65.

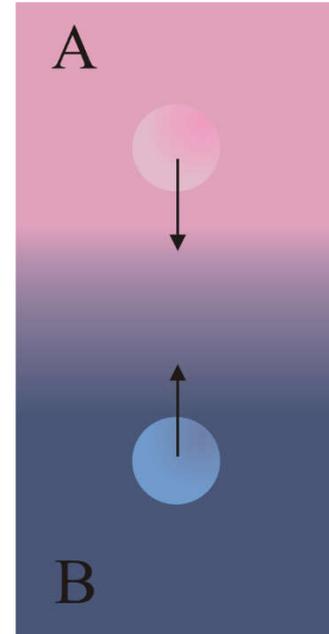


Рис. 1. Схема процесса встречной диффузии растворённых компонент А и В в двухслойной системе смешивающихся жидкостей.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ ЖЕСТКОГО РОТОРА, ВРАЩАЮЩЕГОСЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

А.В. Мухин

Институт информационных технологий, математики и механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород

e-mail: myhin-aleksey@yandex.ru

Рассмотрена задача оптимальной стабилизации механической системы, представляющей собой жесткий ротор, вертикально вращающийся в электромагнитных подшипниках (схема жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках – см. ниже) [1].

Фазовое пространство системы определялось двенадцатью переменными $x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_{12})^T$. Восемь первых переменных описывают механические параметры, а четыре последних – электрические параметры системы.

Для решения задачи формировался закон управления по выходу в форме линейного динамического регулятора полного порядка. В качестве измеряемых и управляемых параметров системы рассматривались токи в цепях электромагнитов. В качестве критерия оптимальности использовалась обобщенная H_∞ -норма линеаризованной системы, позволяющая учесть как внешнее возмущение, так и начальное отклонение ротора.

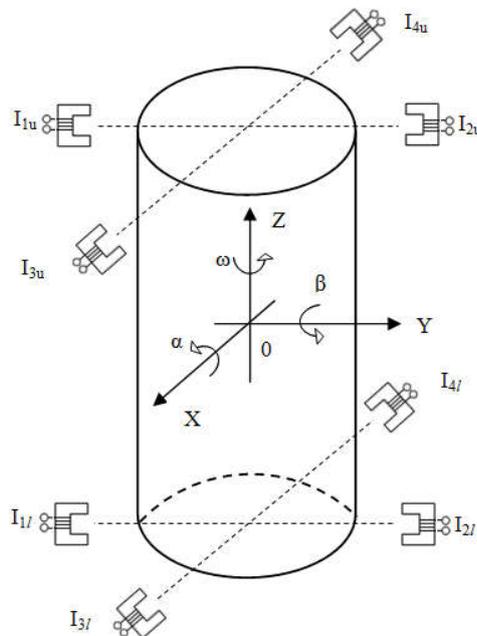


Рис. Схема жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках.

В качестве математического инструментария использовались техника линеаризации исходной системы нелинейных дифференциальных уравнений [2], аппарат линейных матричных неравенств [3], а также методы теории выпуклой оптимизации [4].

Представлены результаты численных экспериментов математического моделирования динамики вращающегося ротора. Результаты показали, что измеряя только токи в цепях электромагнитов, можно синтезировать закон управления по выходу в форме линейного динамического регулятора полного порядка.

1. Мухин А.В. Математическое моделирование процесса стабилизации жесткого ротора, вращающегося в электромагнитных подшипниках // Труды ННГУ им. Р.А. Алексеева. 2020 (в печати).

2. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Физматлит, 1974.

3. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007.

4. Gahinet P., Nemirovski A., Laub A. J., Chilali M. The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide.- Natick, MA: The MathWorks, Inc., 1995.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ СИСТЕМ СВОБОДНО ДВИГАЮЩИХСЯ ТЕЛ

В.С. Никитин^{1,2}

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

²ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва

e-mail: zogorlol@gmail.com

В существенно нестационарных задачах газовой динамики ключевую роль играет построение хорошей расчетной сетки, адекватной задаче. Если эволюция течения неизвестна априори, то ручное или полуавтоматическое создание сетки становится не только неэффективным, но и невозможным. Необходима возможность автоматической адаптации расчетной сетки между расчетными шагами по времени. Для этого предлагается алгоритм локальной адаптации для широко используемых в газовой динамике декартовых сеток, на основе неравномерного локального вейвлет-анализа окрестности ячейки.

Для расчета течений газа с твердыми включениями используется метод свободной границы (1). В нем влияние твердых тел на течение учитывается введением компенсационных потоков в правые части уравнений. Это позволяет вести расчет сквозным образом по всем ячейкам, включая содержащие твердое тело, что в свою очередь позволяет обеспечить гладкое продолжение решение внутри тела. Хотя эти фиктивные ячейки, не содержащие газа, не влияют на полностью или частично заполненные газом ячейки, гладкое продолжение используется для инициализации ячеек в случае смены их статуса при движении тела.

В ходе расчета компенсационных потоков рассчитывается пристеночное давление фрагмента поверхности твердого тела, пересекающего с ячейкой. По этим данным можно численным интегрированием получить силу, действующую на тело. Благодаря этому, можно не только вести расчеты с движением тел по заданному закону движения, но и свободно движущихся тел.

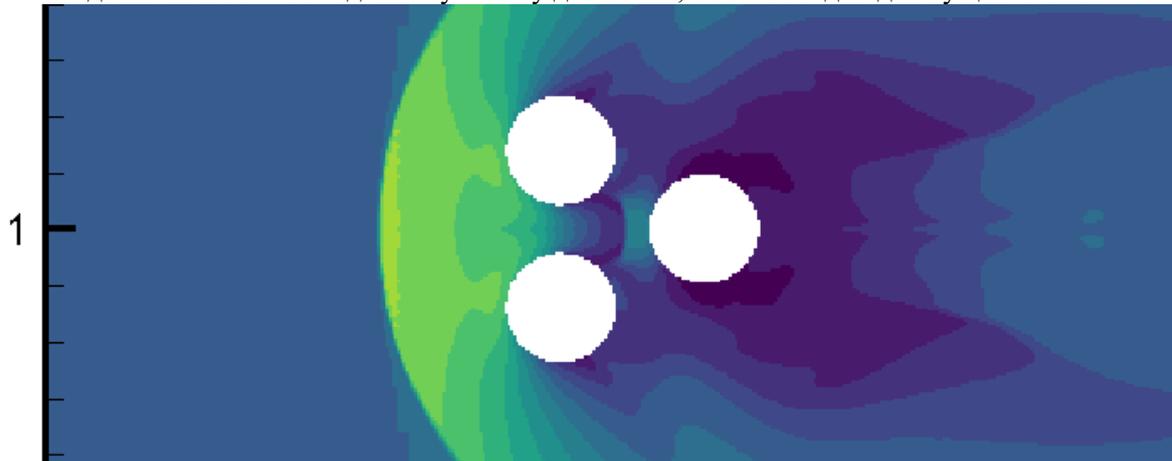


Рис. Промежуточная картина плотности обтекания системы из трех свободных цилиндров.

Такой численный метод был реализован, и с его помощью был проведен ряд расчетов, моделирующий разлетание свободно движущихся цилиндров в сверхзвуковом потоке.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-31-90162.

1. И. С. Меньшов, М. А. Корнев, Метод свободной границы для численного решения уравнений газовой динамики в областях с изменяющейся геометрией, Матем. моделирование, 2014, том 26, номер 5, 99–112

2. Ya. V. Khankhasaeva, A.L. Afendikov, A.E. Lutsky, I.S. Menshov, V. S. Nikitin. Simulation and visualization of the flow around blunted body in the wake of supersonic ejecting pellet. Scientific Visualization, Vol. 11, No. 1, pp. 57-69, 2019.

3. Афендиков А. Л., Луцкий А. Е., Меньшов И. С., Никитин В. С., Ханхасаева Я. В. Численное моделирование вылета пеллета из затупленного тела. Препринты РАН, 15 с., 2017.

4. Афендиков А. Л., Луцкий А. Е., Меньшов И. С., Никитин В. С., Ханхасаева Я. В. Численное моделирование возвратного течения при разделении движущихся со сверхзвуковыми сокростями тел. Математическое моделирование, том 31, 2019.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ БОКОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ПЛОСКОСТЯХ СИММЕТРИИ, И КОРПУСА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

А.А. Новикова, В.А. Фролов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара
e-mail: novikova_nastasiya@mail.ru

Цель исследования – экспериментальное определение коэффициентов интерференции согласно методике [1] для следующих комбинаций ракеты-носителя (РН): с двумя боковыми ускорителями (БУ) в горизонтальной плоскости симметрии (комбинация 1) [2], с двумя БУ в вертикальной (комбинация 2) и с четырьмя БУ в двух перпендикулярных плоскостях (комбинация 3). Объектом исследования является подобные тела вращения с коническими носовыми частями: корпус и БУ диаметрами 45 и 31,5 мм, соответственно. Ниже на рисунке маркерами отмечены экспериментальные значения коэффициента нормальной силы, полученные для модели РН, у которой удлинения головной части корпуса и БУ одинаковы и равны 2, удлинения цилиндрических частей также одинаковы и равны 6. Более подробное описание моделей представлено в [1, 2].

Коэффициент интерференции $K_{\text{корп(БУ)}}$, учитывающий влияние БУ на корпус, для комбинации 1 равен 1,59; для комбинации 2 – -0,57; для комбинации 3 – 0,81. Значения коэффициента $K_{\text{БУ(корп)}}$, учитывающего влияние корпуса на БУ, соответственно: 3,72, -0,68 и 2,14.

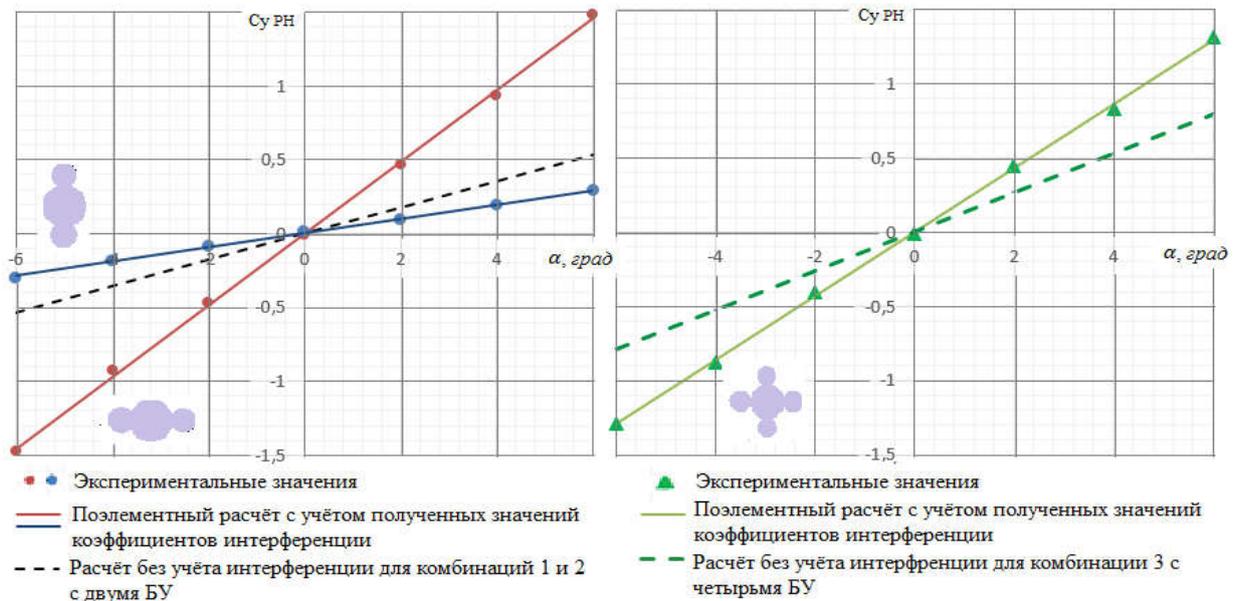


Рис. Зависимости коэффициента нормальной силы от угла таки для трёх комбинаций РН.

Для комбинаций 1 и 3 полученные экспериментально значения коэффициента нормальной силы с учётом взаимного влияния БУ и корпуса значительно больше коэффициентов нормальной силы, найденных на основании поэлементного расчёта без учёта интерференции. Для комбинации 2 коэффициенты интерференции получены отрицательные, следовательно, взаимное влияние БУ и корпуса не является благоприятным. В этом случае значения коэффициента нормальной силы, полученные экспериментально, меньше, чем значения того же коэффициента, полученные с помощью поэлементного расчёта без учёта интерференции.

Таким образом, можно сделать вывод, что для исследованных комбинаций РН влияние интерференции значительно и численно может быть представлено с помощью найденных коэффициентов интерференции.

1. Новикова А.А., Фролов В.А. Методика экспериментального исследования интерференции модели ракеты-носителя //Международная молодёжная научная конференция «XV Королёвские чтения», посвящённая 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова. 2019. Т.1. С. 170-171.

2. Новикова А.А. Интерференция моделей ракеты-носителя с боковыми ускорителями, расположенными в горизонтальной плоскости симметрии //Международная молодёжная научная конференция «XXIV Туполевские чтения (школа молодых учёных)». 2019. Т. 1. С. 83-88.

ДИНАМИКА КОРПУСА КОЛЕСНОГО АППАРАТА НА «МИКСТЕ»

А.П. Новодерова

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

e-mail: an.novoderova@yandex.ru

Рассматривается динамика корпуса двухосного четырехколесного аппарата (автомобиля, робота и т.д.) при попадании колес ведущей оси на «микст» – участок опорной плоскости с различными коэффициентами трения для колес одной оси. Для автомобиля такая ситуация возможна при въезде на обледенелую обочину, в лужу масла и т.п. Ранее в [1,2] было показано, что после завершения быстрого переходного процесса выравнивания контактных сил корпус аппарата получает импульс угловой скорости, способный привести к заносу. В зависимости от условий движения аппарата рассматриваются разные модели сил взаимодействия его колес с опорной плоскостью. Для описания динамики колес аппарата без потери сцепления с опорной плоскостью используются модель непроскальзывания и модель увода в продольном и поперечном направлениях, для описания скольжения колес – модель трения Кулона и модель поликомпонентного сухого трения. Математические модели динамики аппарата формируются с использованием методов разделения быстрых и медленных движений, основанных на подходах фракционного анализа и теории сингулярных возмущений [3]. Возможность их применения связана с сильным разнесением постоянных времени движения аппарата на начальной стадии заноса [1–4]. Получены оценки импульсов угловой скорости, и показано, что моменты вращения колес слабо влияют на эти оценки, но важны при исследовании динамики корпуса аппарата на «миксте» после воздействия импульса угловой скорости. Описано развитие заноса, определяемого более медленной динамикой корпуса аппарата, для перечисленных случаев движения с уводом и со скольжением колес.

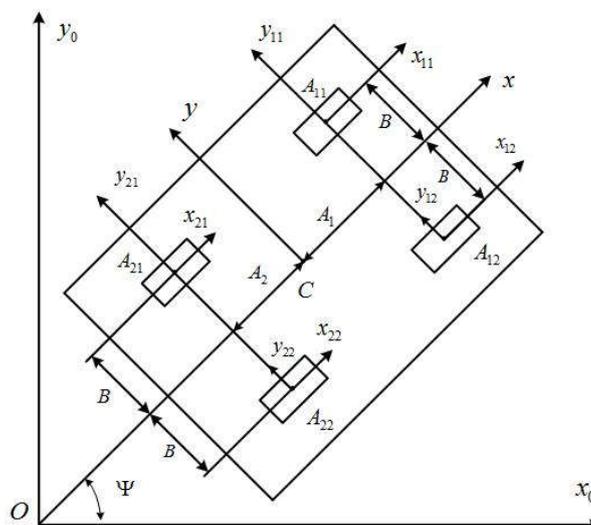


Рис. Модель четырехколесного аппарата.

Благодарности. Данная работа была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант 19-8-2-29-1.

1.Новожилов И.В., Павлов И.С., Фрольцов В.А. О поведении автомобиля на «миксте» // Механика твердого тела. 2001. № 3. С. 61–67.

2.Влахова А.В., Новодерова А.П. Занос колесного аппарата на «миксте» // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.). №5.

3.Влахова А.В. Математические модели движения колесных аппаратов. М.-Ижевск: АНО «Ижевский институт компьютерных исследований», 2014. 148 с.

4.Влахова А.В., Новодерова А.П. Моделирование заноса аппарата с повернутыми передними колесами // Изв. РАН. МТТ. 2019. № 1. с.23-49.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОГО СОКРАЩЕНИЯ В МИОКАРДЕ

А.Ш. Осепян¹, Ф.А. Семин^{1,2}, А.К. Цатурян¹

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

²Российский университет дружбы народов, Москва

e-mail: ann626@mail.ru

Моделирование работы сердца важно для глубокого понимания механизмов его работы и регуляции в норме и при патологиях. В клинических и экспериментальных исследованиях обнаружено влияние деформаций на распространение электрического возбуждения в сердце. Роль этого явления в нарушениях ритма сердца не изучена. В докладе представлена электромеханическая модель сердечной ткани, основанная на кинетической модели механики мышцы [1], которую объединили [2] с простой моделью электрической активности сердечной мышцы [3]. В модель были добавлены уравнения, описывающие перераспределение ионов кальция между внутриклеточными фазами и зависимости межфазных потоков от разности электрического потенциала на клеточной мембране. Это позволило описать изменения амплитуды сокращения миокарда при изменении интервалов между стимулами [2]. Численные расчеты двумерных задач о распространении электромеханических волн в плоском слое миокарда проводили методом конечных элементов [4]. Учитывали электрическую и механическую анизотропию миокарда и возможную зависимость емкости мембраны клеток сердечной мышцы и электрической проводимости от деформаций. Кинетические уравнения модели для переменных, определяемых в точках интегрирования элементов, решали методом Эйлера. Сокращение ткани инициировали стимулирующим электрическим током на границе или во внутренних точках квадратной области.

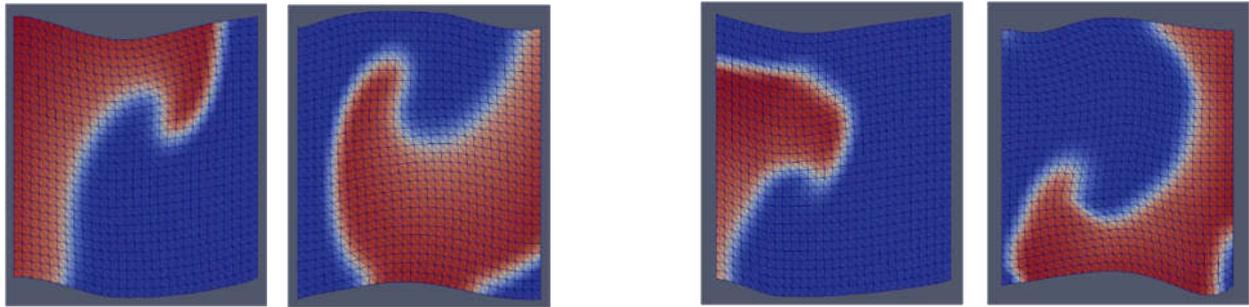


Рис. Вращение спиральной волны в квадратной области ткани миокарда без учета (слева) зависимости емкости клеточных мембран от деформации миокардиальной ткани и с учетом (справа). Ось анизотропии направлена под углом 60° к нижней кромке недеформированной области.

В ходе расчетов распространения электромеханических волн выяснилось, что влияние деформаций на электрические процессы изменяет картину распространения потенциала действия и деформаций сердечной мышцы и может играть существенную роль в аритмогенезе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-31-00065.

1. Syomin F. A., Tsaturyan A. K. A simple model of cardiac muscle for multiscale simulation: passive mechanics, crossbridge kinetics and calcium regulation // *J. Theor. Biol.* 2017. 420: 105–116.

2. Syomin F. A., Tsaturyan A. K. A simple electromechanical model of cardiac muscle for multiscale simulation of the heart // *Abstracts of the 8th World Congress of Biomechanics, Dublin, Ireland, 8-12 July 2018.*

3. Aliev R. R., Panfilov A. V. A simple two-variable model of cardiac excitation // *Chaos, Solitons & Fractals.* 1996. 7(3): 293–301.

4. Осепян А.Ш., Семин Ф.А., Цатурян А.К. (2019). Электромеханическая модель сердечной ткани. Сборник научных трудов VI Съезда биофизиков России, Т. 1, С. 209–210. ООО Полиграфическое объединение Плехановец, Краснодар.

РАННИЙ ПРОГНОЗ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОМ ТИТАНЕ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА

М. Писарев^{1,2}, Е.С. Емельянова^{1,2}, В.А. Романова²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск.

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

e-mail: maxim.ximka00@gmail.com

Формирование деформационного рельефа на свободной поверхности в процессе пластического деформирования является общей особенностью поликристаллических металлов и сплавов. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что морфологические изменения на поверхности происходят на всей иерархии масштабов от микро до макроуровня. Мезоуровень, исследуемый в данной работе, является связующим звеном между процессами микроуровня, где пластическая деформация обусловлена дислокационными механизмами, и макроуровнем, где макролокализация пластической деформации предшествует разрушению. Изменения на поверхности могут служить индикатором внутреннего состояния материала и, таким образом, использоваться для разработки методов неразрушающего контроля в процессе эксплуатации.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей формирования и эволюции мезоскопического деформационного рельефа в образцах поликристаллического титана и установление корреляции рельефных характеристик со стадиями деформации. По экспериментальным профилям шероховатости, полученным методом stop-and-study [1] на разных стадиях одноосного растяжения при скоростях деформации $4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ рассчитывался безразмерный параметр интенсивности деформационного рельефа [1]. Показано, что параметр растет нелинейно и начинает быстро увеличиваться в области образования шейки задолго до ее макроскопического проявления (рис. 1). Показано, что скорость нагружения влияет на степень неоднородности напряженно-деформированного состояния образца. Предполагается, что полученные данные о корреляции характеристик мезоскопического деформационного рельефа со степенью локальной деформации могут быть использованы для прогнозирования области локализации пластической деформации и разрушения и оценки остаточного ресурса материала. $1 \cdot 10^{-3}$

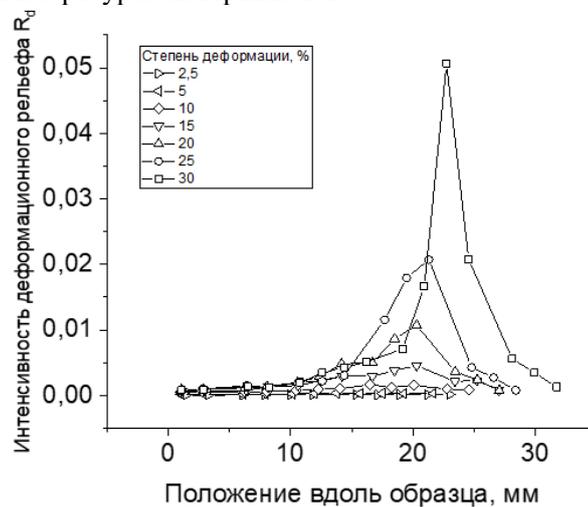


Рис.1 Интенсивность деформационного рельефа по длине образца при скорости деформации $4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00600).

1. V. Romanova, R. Balokhonov, E. Emelianova [et al.] Early prediction of macroscale plastic strain localization in titanium from observation of mesoscale surface roughening // Int. J. Mech. Sci. 2019. 161-162. P. 105047.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА КРЕМНЕСОДЕРЖАЩИХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ

А.А. Крупнов, М.Ю. Погосбекян

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: kroupnov@imec.msu.ru, pogosebekian@imec.msu.ru

За фронтом сильной ударной волны, образующейся при движении летательного аппарата с гиперзвуковой скоростью в плотных слоях атмосферы, поступательная температура газа может достигать десятков тысяч градусов, и физико-химические процессы происходят в термически-неравновесных условиях. В результате этих процессов молекулы преимущественно распадаются на атомы, которые и взаимодействуют с поверхностью теплозащитных покрытий. Моделирование химических реакций, протекающих в газовой фазе, с учетом неравновесных эффектов дает изменение теплового потока по сравнению с равновесным приближением на 25-30%. В то время как при использовании различных моделей гетерогенных химических реакций тепловой поток может изменяться в несколько раз. В этой связи особенно важно правильно описывать гетерогенные процессы - адсорбция, десорбция, ударная и ассоциативная рекомбинация. Материалы на основе кремния активно используются при проектировании теплозащитных покрытий космических и перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. В работе исследовались гетерогенные реакции на поверхности карбида кремния SiC и β -кristобалита SiO₂ методами квантовой механики и молекулярной динамики. С использованием программы GAUSSIAN проведены расчеты поверхностей потенциальной энергии (ППЭ), отвечающих взаимодействию атомов O и N с кластерами SiO₂ и SiC, моделирующими соответствующие поверхности кристаллов. Уравнение Шредингера решалось методом теории функционала электронной плотности DFT с расширенным гибридным трехпараметрическим обменным функционалом Беке, дополненный электронной корреляцией Ли, Янга и Пэра (X3LYP). В качестве базисных функций использовался корреляционно-согласованный поляризованный валентный трехэкспоненциальный базисный набор cc-pVTZ. Данный подход использовался ранее при исследовании процессов в газовой фазе [1,2]. На основе полученных ППЭ проведено молекулярно-динамическое моделирование столкновения атомов N и O с поверхностью SiO₂ и SiC с учетом внутренней релаксации верхних слоев кристаллической решетки. Определены константы скорости процессов адсорбции/десорбции и ударной рекомбинации.

квантовая механика → поверхность потенциальной энергии → молекулярная динамика

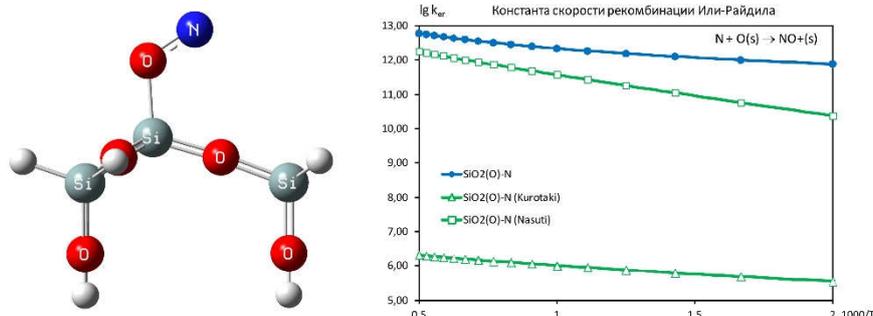


Рис. Схема моделирования гетерогенных реакций на поверхности теплозащитных материалов.

Работа проведена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00741А. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

1. Kroupnov A.A., Pogosebekian M.Ju. Detailed mechanism of exchange reactions CO+N, CN+O and NO+C on the 4A'' potential energy surface at high temperature // Chemical Physics. 2019. Т. 523. С. 172–178.

2. Крупнов А. А., Погосбекян М. Ю. Анализ экспериментальных данных взаимодействия CO и N₂O с образованием CO₂ на основе результатов DFT-расчетов // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 2. С. 181–192.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ MPI И CUDA

М.Ю. Погосбекян, А.А. Крупнов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: kroupnov@imec.msu.ru, pogosbekian@imec.msu.ru

Программный комплекс “MD Trajectory” был разработан для исследования элементарных газофазных химических реакций (диссоциация, обменная реакция, процессы колебательной релаксации) методом квазиклассических траекторий (МКТ). Функциональность “MD Trajectory” была расширена для исследования гетерогенной рекомбинации атомов методами молекулярной динамики. “MD Trajectory” позволяет исследовать оба механизма гетерогенной рекомбинации Или-Ридела и Ленгмюра-Хиншельвуда. Основной целью этих расчетов является определение коэффициентов гетерогенной рекомбинации и аккомодации химической энергии. МКТ расчеты требуют огромных вычислительных ресурсов. Современные суперкомпьютерные кластеры достигли к настоящему моменту огромных показателей производительности. Для использования кластерных систем и графических ускорителей МКТ код был распараллелен на основе технологии Message Passing Interface (MPI) и Compute Unified Device Architecture (CUDA). “MD Trajectory” был протестирован на кластерах ВЦ МГУ и МСЦ РАН и был получен хороший показатель эффективности. Таким образом, вычислительный комплекс “MD Trajectory” является достаточно мощным инструментом для исследования химических реакций методом МКТ, особенно для условий трудно реализуемых в эксперименте. В работе будут продемонстрированы основные возможности вычислительного комплекса и особенности его реализации применительно к многопроцессорным системам.

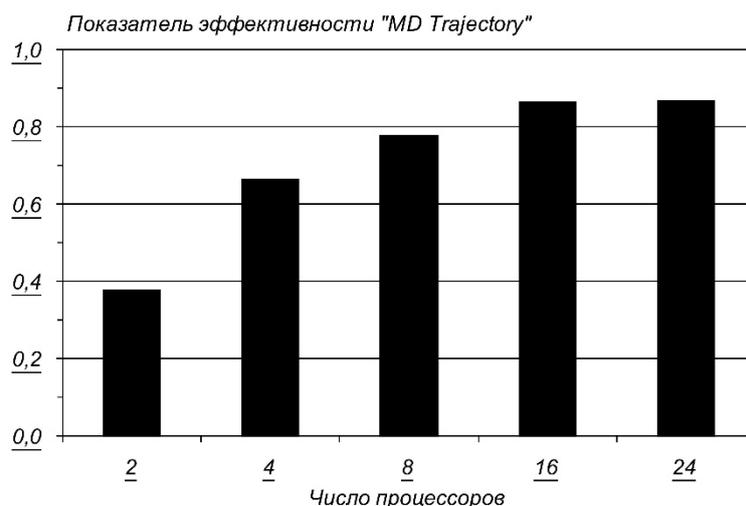


Рис. Показатель эффективности вычислительного комплекса “MD Trajectory” в зависимости от числа используемых процессоров.

Работа проведена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00741А. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

1.V.L. Kovalev, A.A. Krupnov, M.J. Pogosbekian, L.P. Sukhanov Analysis of heterogeneous recombination of oxygen atoms on aluminum oxide by methods of quantum mechanics and classical dynamics // Acta Astronautica. 2011. Vol. 68, no. 7-8. P. 686–690.

2.Погосбекян М. Ю., Сергиевская А. Л. Моделирование реакции диссоциации кислорода в термически неравновесных условиях: модели, траекторные расчеты, эксперимент // Химическая физика. — 2018. — Т. 37, № 4. — С. 20–31.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ-НЕРАВНОВЕСНОЙ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ NO ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

А.А. Крупнов, М.Ю. Погосбекян, А.Л.Сергиевская

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: kroupnov@imec.msu.ru, pogosbekian@imec.msu.ru, sergievska@yandex.ru

Для моделирования физико-химических процессов, протекающих за фронтом ударных волн в воздухе при высоких температурах, требуются константы скоростей химических реакций в условиях отсутствия равновесия между колебательными и поступательными степенями свободы молекул реагентов. В этих условиях, как правило, при моделировании процессов диссоциации используется модовое приближение, когда константа скорости химических реакций $k(T, T_v)$ зависит от двух температур – поступательной T и колебательной T_v . При использовании урвневового приближения необходимо знание массива урвневых констант скоростей реакций $k_{vw}(T)$, которые зависят не только от поступательной температуры T , но и номеров колебательных урвней реагентов v и продуктов реакции w .

В работе исследовалась диссоциация молекул NO при столкновении с атомами N методами квантовой механики и молекулярной динамики. В рамках метода теории функционала плотности DFT (X3LYP/cc-pVTZ) были рассчитаны поверхности потенциальной энергии (ППЭ), соответствующие различным конфигурациям молекулярной системы, и построена результирующая ППЭ, описывающая исследуемую реакцию. Получено аналитическое представление ППЭ в виде расширенной функции Сорби-Маррелла.

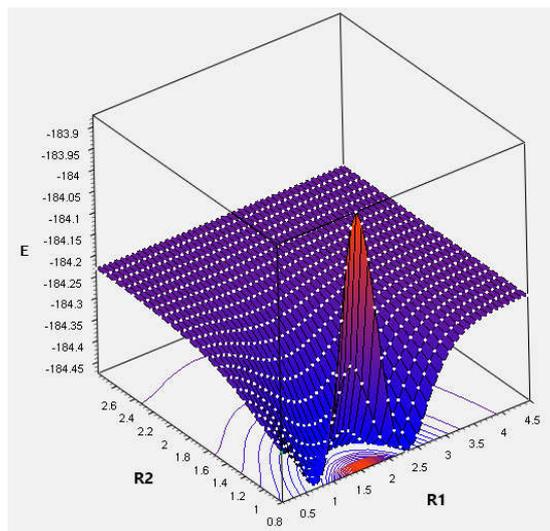


Рис. Поверхность потенциальной энергии для системы N-O-N при мультиплетности $m=5$ и фиксированном расстоянии $R(N-N) = 3\text{Å}$.

Методом молекулярной динамики с использованием новой ППЭ были рассчитаны константы скорости процесса диссоциации $\text{NO} + \text{N} \rightarrow 2\text{N} + \text{O}$ в двухтемпературном и урвневом приближениях для диапазона температур 2000-20000 К. На основе полученных данных была проведена верификация различных теоретических моделей (модель Мерроуна-Тринора, Смехова, Кузнецова и др.) и определены ключевые параметры этих моделей для последующего использования при описании химической кинетики в термически-неравновесных условиях.

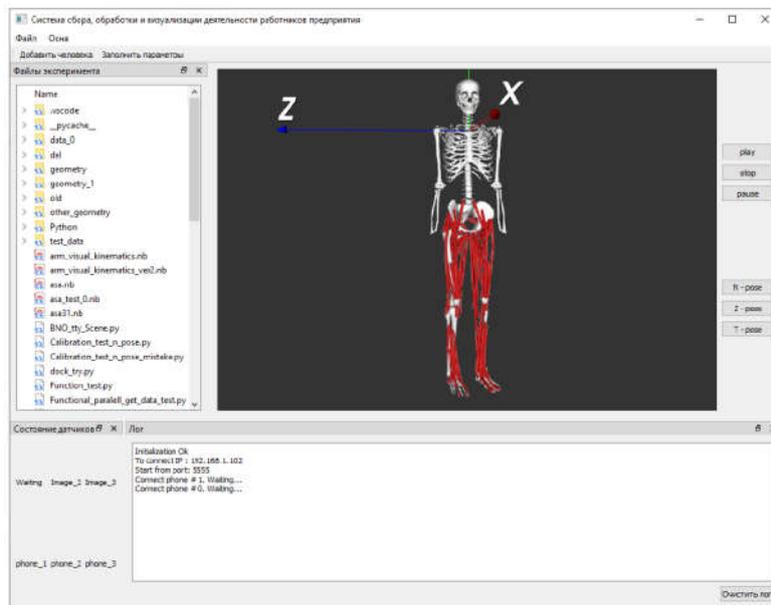
Работа проведена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00741А. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

1. Погосбекян М.Ю., Сергиевская А.Л., Крупнов А.А. Исследование моделей термически неравновесной диссоциации в воздухе // Nonequilibrium processes. Vol. 1. Kinetics and plasma. Edited by S.M. Frolov and A. I. Lanshin. T. 1. TORUS PRESS Moscow, 2019. С. 264–274.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ С IMU ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ

А.В. Подопросветов, И.А. Орлов
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва
e-mail: ilecxis@gmail.com

Данное исследование посвящено внедрению экзоскелетов в промышленность. Целью является создание комплекса программных и аппаратных средств для распознавания движений человека, необходимого для проведения экспериментов, направленных на достижения двух основных задач. Во-первых, показать энергоэффективность экзоскелетов для людей, которые используют экзоскелеты в обычных производственных задачах. Во-вторых, создать уникальную интеллектуальную систему управления для автоматической помощи оператору полупассивного экзоскелета, и предоставить рекомендации по ведению рабочих процессов. Прделанная работа заключается в разработке программного комплекса, с алгоритмами сбора и хранения данных, реконструкции траектории движения человека, системы визуализации данных и оптимизации модели человека. Полученная система позволяет быстро и точно собирать данные в производственных условиях для подсчета энергоэффективности экзоскелетов. Данный программный комплекс позволит собрать достаточно данных для применения методов машинного обучения в системе управления экзоскелетом.



Внешний вид приложения по сбору и визуализации данных.

Рассматривается упрощённая модель тела человека, состоящая из десяти звеньев, по два на каждую конечность и два звена на спину. Каждое звено неотрывно прикреплено к предыдущему сферическим шарниром. Ориентация каждого звена определяется по показаниям IMU-датчиков соответственно надетых на человека. Предполагается, что на человеке надето столько же датчиков, сколько и звеньев в модели, при том в соответствующих местах. На начальном этапе известна примерная точка крепления датчика на теле, а ориентация датчика может быть произвольной. Для ее вычисления проводится двух этапная калибровка. В рамках разработки системы визуализации решаются задачи оптимизации длин звеньев модели человека и задача восстановления траекторий движения частей тела. Затем производится экспериментальная проверка качества откалиброванной модели. По восстановленным траекториям эксперимента решается прямая задача динамики, и оценивается энергия, затрачиваемая человеком при совершении действий в эксперименте.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-71-10112.

1. Подопросветов А.В., Анохин Д.А., Орлов И.А., Алисейчик А.П. Разработка системы управления биомеханическим комплексом помощи работникам производственных предприятий // В сборнике: XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник трудов в 4-х томах. 2019. С. 196-198.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕЙСТВИЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ ВИДЕОПОТОКА

А.В. Подопрсветов, В.П. Парамонов, И.А. Орлов
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва
e-mail: llecxis@gmail.com, i.orlov@keldysh.ru

В последнее время возрастает необходимость в улучшении условий работы сотрудников предприятий для повышения эффективности и снижения травмоопасности рабочих процессов. Использование промышленных экзоскелетов стало одной из основных концепций, направленных на решение данной задачи. Наибольшее распространение получили пассивные экзоскелеты, однако они не всегда могут необходимым образом и в нужный момент перераспределить нагрузку. Большой интерес вызывают полуактивные конструкции. Для определения моментов времени включения и выключения экзоскелетов требуется определять как основные действия оператора (ОД – ходьба, поднятие рук, и т.п.), так и переходные действия (ПД – процесс подъема тяжести).

Целью работы является создание модели классификации действий человека с наилучшей метрикой качества, используя видеопоследовательности. В работе рассматривается задача классификации целевых действий человека по данным, получаемым с оптических датчиков (ранее было рассмотрено решение, основанное на инерциальных датчиках [2]). В качестве примера рассматривается задача покраски стены с двумя целевыми бинарными переменными: угол между плечом и туловищем больше или меньше критического, и целевое состояние – красит человек стену или нет.

В рамках задачи были сняты 5 пар параллельных видео с двух разных ракурсов длительностью по 6 минут каждое, на которых человек занимается покраской стены. Для получения информации с кадра была выбрана система OpenPose [1], которая для каждого кадра видео возвращала координаты ключевых точек человека, изображенного на кадре. Таким образом, была собрана обучающая выборка с номером кадра, двумя бинарными целевыми переменными и координатами 25 ключевых точек на человеке.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-31-20068 мол_а_вед.

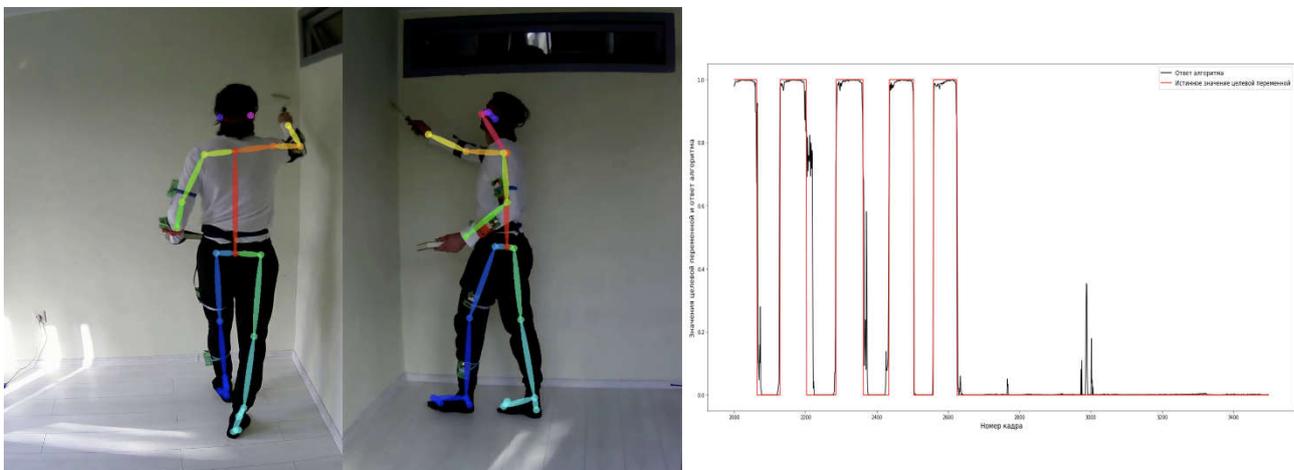


Рис. 1: Пример работы системы OpenPose на съёмке с двух ракурсов и зависимость целевой переменной (красная линия) и ее вероятности из алгоритма (черная линия) от номера кадра.

По результатам анализа построенных моделей был выбран алгоритм XGBClassifier. Для сравнения моделей были выбраны метрики ROC AUC и Accuracy. Полученные результаты обучения на первом целевом действии дают точность ROC AUC – 98% и Accuracy – 94%, на втором целевом действии – ROC AUC – 99% и Accuracy – 95%.

1. Cao Z. et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields //arXiv preprint arXiv:1812.08008. – 2018.

2. Подопрсветов А.В. и др. Разработка системы управления биомеханическим комплексом помощи работникам производственных предприятий // В сборнике: XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник трудов в 4-х томах. 2019. С. 196-198.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ ТРУБКИ БЕСКОНЕЧНОЙ И КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ВНУТРИ ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

А.Б. Подопросветова^{1,2}

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

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

e-mail: poroshina_ab@mail.ru

В биологических приложениях при течении жидкостей в моделях кровеносных сосудов возникают различные явления, которые оказывают влияние на характер течения и на деформацию стенок, что влечёт за собой дисфункциональные изменения в организме человека или животного.

Ранее в литературе исследовались, в основном, течения ньютоновской (линейно-вязкой) или идеальной жидкости [1, 2]. Хотя, кровь в средних и мелких сосудах обладает неньютоновскими свойствами. При этом одномерное моделирование течения крови по кровеносным сосудам является удобным инструментом для изучения динамики биологической жидкости в системе кровообращения.

Данное исследование проводилось классическими методами теории устойчивости, на основе ранее разработанной одномерной модели [3, 4]. Для трубок бесконечной длины рассматривались решения в виде бегущих волн и выводилось дисперсионное уравнение. Анализом его корней находились области неустойчивости в пространстве параметров.

Поскольку критерий устойчивости для сколь угодно большой длины трубки не совпадает с критерием устойчивости для бесконечно длинной трубки, то для определения границ устойчивости задача была исследована на нахождение области глобальной неустойчивости. В данном случае использовался асимптотический метод глобальной неустойчивости, разработанный А.Г. Куликовским [5].

Кроме того, для трубок конечной длины была решена задача на собственные значения. Граница устойчивости исследовалась численно с учетом упругости стенки трубы, продольного натяжения и длины трубки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-10020.

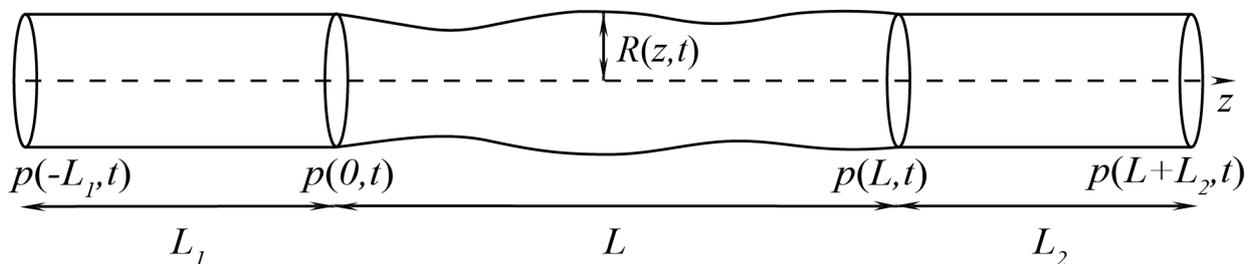


Рис. Осесимметричное возмущение упругой трубки.

1. Grotberg J.B., Jensen O.E. Biofluid mechanics in flexible tubes // Ann. Rev. Fluid Mech. 2004. Vol.36. P.121–147.

2. Heil M., Hazel A.L. Fluid-Structure Interaction in Internal Physiological Flows // Ann. Rev. Fluid Mech. 2011. Vol.43. P.141–162.

3. Порошина А.Б., Веденеев В.В. Существование и единственность стационарного состояния упругой трубки при протекании через нее степенной жидкости // Российский журнал биомеханики. 2018. Т. 22. № 2. С. 196–222.

4. Веденеев В.В., Порошина А.Б. Устойчивость упругой трубки, содержащей текущую неньютоновскую жидкость и имеющей локально ослабленный участок // Труды МИАН. 2018. Т. 300. С. 42–64.

5. Куликовский А.Г. Об устойчивости однородных состояний // Известия АН СССР. ПММ. 1966. Т. 30. Вып. 1. С. 148–153.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГОЙ ТРУБКИ

А.Б. Подопрсветова, В.В. Веденеев
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: poroshina_ab@mail.ru

Известно, что взаимодействие кровотока с биологическими сосудами и их возможная потеря устойчивости являются значительными проблемами в механике сердечно-сосудистой системы. В связи с этим, исследованием колебаний упругих трубок, используемых в качестве моделей сосудов, занимаются различные группы в течении десятилетий [1,2].

На данный момент существует несоответствие между большим количеством экспериментальных исследований с турбулентным течением жидкости в упругой трубке [3,4] и биомеханическими применениями, где поток в большей части сердечно-сосудистой системы ламинарный. Следовательно, изучение влияния режимов потока на возникновение и характер колебаний модельного кровеносного сосуда представляет большой интерес.

Сначала производится подбор разных жидкостей таким образом, чтобы их числа Рейнольдса соответствовали равным перепадам давления, одинаковым средним скоростям и равным трансмуральным давлениям (разность внутреннего и внешнего давлений), обеспечивающим совпадение форм трубки. В результате эти потоки будут отличаться только режимом течения, ламинарный или турбулентный. Данные потоки были организованы с использованием воды на турбулентном режиме и растворов глицерина на ламинарном режиме.

Было проведено сравнение границ устойчивости и были выявлены четыре типа колебаний, наблюдаемые по датчикам перепада давления, датчику выходного давления и визуализации режимов колебаний трубки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-10020.

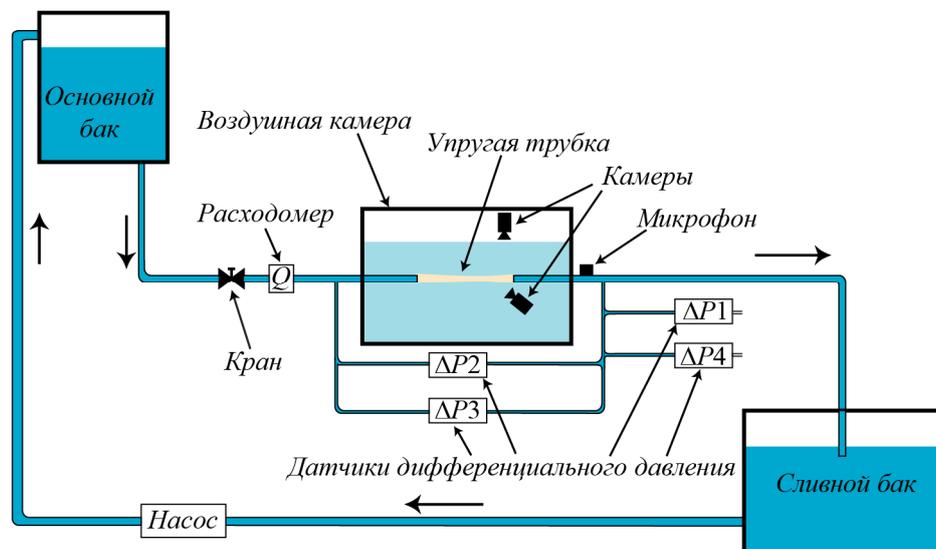


Рис. Схема установки.

1. J.B. Grotberg, O.E. Jensen. Biofluid mechanics in flexible tubes // *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2004, 36, 121-147.

2. Порошина А.Б., Веденеев В.В. Существование и единственность стационарного состояния упругой трубки при протекании через нее степенной жидкости // *Российский журнал биомеханики*, 2018, издательство Перм. нац. исслед. политехн. ун-т (Пермь), том 22, № 2, с. 196-222.

3. Gavriely N., Shee T.R., Cugell D.W. & Grotberg J.B. Flutter in flow-limited collapsible tubes: a mechanism for generation of wheezes // *J.Appl. Physiol.* 1989. V. 66(5). P. 2251-2261.

4. Bertram C.D., Elliott N. S. J. Flow-Rate Limitation in a Uniform Thin-Walled Collapsible Tube, With Comparison to a Uniform Thick-Walled Tube and a Tube of Tapering Thickness // *J. Fluids Struct.* 2003. V. 17(4). P.541-559.

ОПИСАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ПОЛИТРОПНОГО ГАЗА С КОСОЙ СТЕНКИ В ВАКУУМ В ПРОСТРАНСТВЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Е.И. Понькин

Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск

e-mail: epnk@rambler.ru

В работе в пространстве физических переменных построены автомодельные решения системы уравнений газовой динамики (СУГД), которые описывают двумерные течения, возникающие при истечении политропного газа с косоугольной стенки в вакуум. Ранее решение этой задачи в частном случае было построено в пространстве годографа [1].

Для рассматриваемой СУГД в соответствии с теоремой о существовании и единственности аналитического решения характеристической задачи Коши стандартного вида [2] найдены необходимые условия разрешимости ХЗК и построено транспортное уравнение для нахождения первых коэффициентов c_1 , u_1 и v_1 рядов функций c , u и v искомого решения.

Для случая, когда угол наклона косоугольной стенки связан с постоянной адиабаты соотношением $\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{\gamma + 3}{1 - \gamma}$ найдено решение транспортного уравнения и получено точное решение В.А. Сучкова для СУГД в пространстве физических переменных.

Для решения В.А. Сучкова найден закон движения поршня в области двойной волны. Таким поршнем является поверхность, на которой выполняется условие непротекания. На рисунке, в качестве иллюстрации, приведено распределение функции плотности газа в момент времени $t_0 < t < 0$ при сжатии газа поршнем в клиновидной полости.

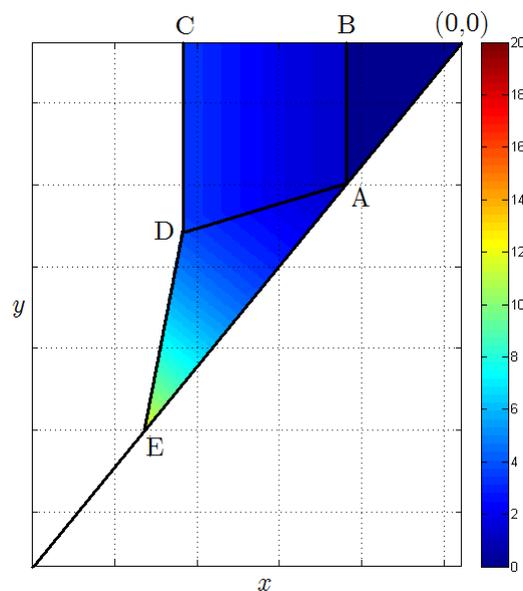


Рис. Распределение функции плотности газа при сжатии газа поршнем в клиновидной полости.

1. Сучков В. А. Истечение газа в вакуум на косоугольной стенке. ПММ. 1963. Т. 27. №4. С. 739–740.
2. Баутин С. П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Новосибирск: Наука, 2009.

ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА ОБТЕКАНИЯ ПЛАСТИНЫ СВЕРХЗВУКОВЫМ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

С.С. Попович, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселев, Ю.А. Виноградов
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: pss@imec.msu.ru

Известно, что поверхность, обтекаемая высокоскоростным потоком, разогревается до температуры близкой к локальной температуре торможения невозмущенного потока. Однако полного восстановления температуры до значения температуры торможения не происходит. Если поверхность теплоизолирована (непроницаема для теплового потока), то ее температура (адиабатная температура стенки) будет равна температуре пристенного слоя газа, в общем случае не равной температуре торможения потока.

Во многих прикладных задачах (теплозащита, безмашинное энергоразделение и т.п.) снижение адиабатной температуры стенки относительно температуры торможения приводит к существенному повышению положительного эффекта [1]. Решение данной задачи возможно через использование свойств газочапельных потоков с малой массовой концентрацией (до процента) жидкой фазы. В этом случае жидкая фаза практически не влияет на свойства основного газового потока, при этом сами капли могут охлаждаться до термодинамической температуры потока.

В работе представлены результаты измерения температуры поверхности плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушным и воздушно-капельным потоком. Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний сенсорных устройств в среде LabView, термопар с термокомпенсацией, зондовых измерений, тепловизионных и оптических методов визуализации картины течения [2].

Металлическая пластина устанавливалась вертикально в рабочем канале аэродинамической установки. Капли жидкости (дистиллированная вода) в воздушный поток распылялись в форкамере через центробежные форсунки. Массовая концентрация жидкости составляла до 0.5% расхода воздуха, средний диаметр капель по Заутеру – 110 мкм, число Маха набегающего потока $M = 2.5, 3.0$. Результаты измерений температуры поверхности пластины для случая однофазного (без капель) воздушного потока сравнивались с результатами для воздушно-капельного потока при одинаковых параметрах (по воздуху) в форкамере.

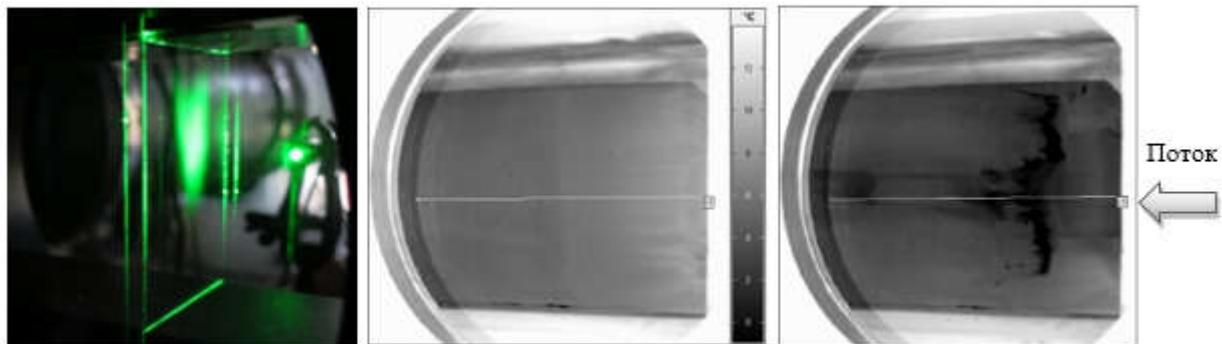


Рис. Визуализация течения лазерным ножом, тепловизионная картина течения воздушного и воздушно-капельного сверхзвукового потока (слева направо).

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики.

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, ИТТС-16. 2018. V. 212244. 8 p.

2. 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.

ИЗМЕРЕНИЕ АДИАБАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА, ОБТЕКАЕМОГО СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

С.С. Попович

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Вследствие вязкой диссипации в пограничном слое сверхзвукового потока сжимаемого газа происходит перераспределение температуры торможения. В результате температура торможения во внутренней части пограничного слоя – адиабатная температура стенки – оказывается ниже, а во внешней части – выше, чем температура торможения в основном потоке (для газов с числом Прандтля меньшем единицы). Определение адиабатной температуры стенки является одной из главных проблем при исследовании теплообмена сверхзвуковых потоков, поскольку ее непосредственное измерение в эксперименте затруднено. Для этого необходимо либо проведение длительных экспериментов на теплоизолированных моделях с достижением равновесного теплового режима, либо использование специальных методик математической обработки кратковременных экспериментов [1].

Внешние воздействия (градиент давления, проницаемость стенки, число Прандтля рабочего тела, форма и рельеф поверхности, скачки уплотнения и отрывные течения) могут приводить как к повышению аэродинамического нагрева в локализованной области, так и к охлаждению стенки. Известен эффект снижения адиабатной температуры стенки до значений ниже термодинамической температуры при поперечном обтекании дозвуковым сжимаемым потоком цилиндра в области задней критической точки (эффект Эккерта-Вайзе). За цилиндром (или, например, за выходной кромкой лопатки турбины) образуется вихревой след с температурной стратификацией по сечению вихря: в центре вихря полная температура ниже начальной, а на периферии – выше. Для сверхзвуковых потоков снижение адиабатной температуры стенки фиксируется в следе за обтекаемым препятствием в виде клина, ребра или ступеньки [2].

Данная работа направлена на исследование возможности снижения температуры по обводу профиля цилиндра, обтекаемого сверхзвуковым потоком сжимаемого газа. Экспериментальное исследование проводится на базе сверхзвуковой аэродинамической установки АР-2, на которой имеется возможность проведения бесконтактных исследований с помощью высокоскоростной ИК-камеры InfraTEC и иллюминатора из ZnSe (коэффициент пропускания 0.7), установленного на боковой стенке рабочей части установки.

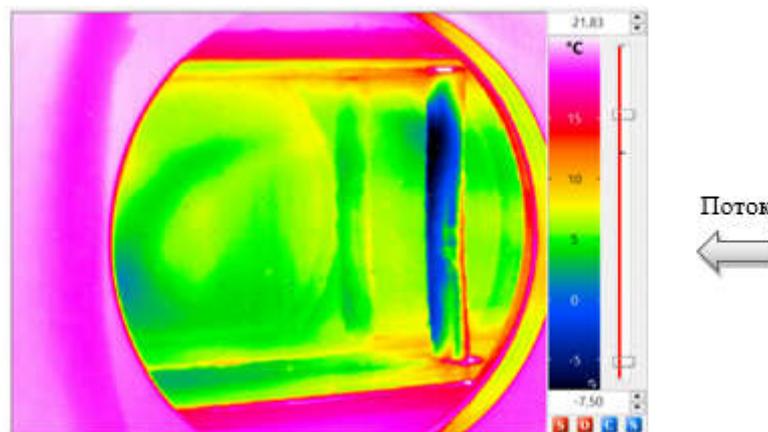


Рис. Тепловизионная картина обтекания цилиндра сверхзвуковым потоком.

Работа выполняется при поддержке стипендии Президента РФ СП-631.2018.1.

1. Попович С.С. Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35–45. DOI: 10.17587/prin.9.35-45.

2. Leontiev A.I., Popovich S.S., Strongin M.M., Vinogradov Y.A. Adiabatic wall temperature and heat transfer coefficient influenced by separated supersonic flow // EPJ Web of Conf. 2017. V. 159. P. 1-5, DOI: 10.1051/epjconf/201715900030.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОАЭРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В КАНАЛЕ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

С.С. Попович, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселев, Ю.А. Виноградов
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: pss@imec.msu.ru

В технике известен способ безмашинного энергоразделения газового потока. В основе данного способа лежит тепловое взаимодействие между сверхзвуковым и дозвуковым потоками, разделенными теплопроводной перегородкой. Сжатый газ разделяется на 2 потока: дозвуковой, текущий, например, по центральному каналу, и сверхзвуковой – по кольцевому [1]. Часть газа, поступающая в сверхзвуковое сопло, теряет полное давление при разгоне и торможении в диффузоре и подогревается за счет теплообмена через стенку с дозвуковым потоком.

С помощью устройства энергоразделения можно компенсировать снижение температуры газа при дросселировании. Ранее было показано, что дроссель-эффект при работе устройства энергоразделения на воздухе полностью перекрывается нагревом сверхзвукового потока от дозвукового [2]. Актуальным представляется возможность применения устройства энергоразделения для подогрева природного газа при редуцировании его давления на газораспределительных станциях.

В рамках данной работы проводится исследование устройства энергоразделения на гидратообразующем компоненте природного газа – углекислом газе. На первом этапе с помощью ИК-камеры InfraTEC проведено измерение адиабатной температуры стенки при течении в канале сверхзвукового потока углекислого газа, а также серия экспериментальных измерений распределения статического давления по длине канала при работе на воздухе и углекислом газе.

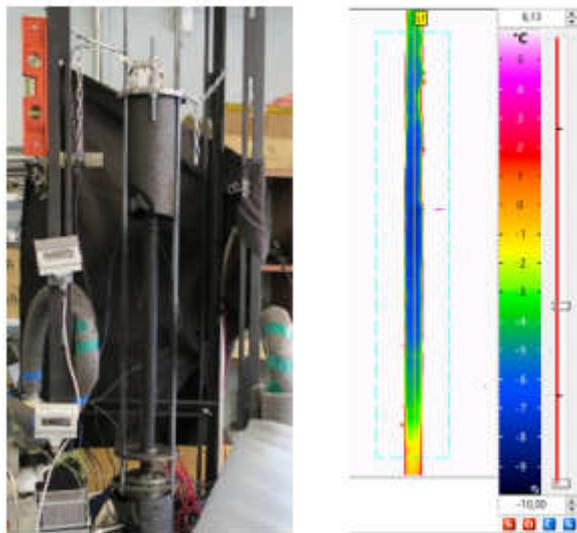


Рис. Фотография сверхзвукового канала и инфракрасная термограмма наружной стенки канала в процессе проведения эксперимента (слева направо).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №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 higher energy separation efficiency // International Heat Transfer Conference. Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC 2018. P. 2987-2994.

2. Попович С.С., Киселёв Н.А., Макарова М.С. Использование сверхзвукового безмашинного энергоразделения для подогрева газа при дросселировании // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 443–446.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫТЕСНЕНИЯ В СЕТИ КАПИЛЛЯРОВ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОЛЯ

Т.П. Любимова^{1,2}, А.М. Воробьев³, С.А. Прокопьев¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Физический факультет ПГНИУ, Пермь

³Университет Саутгемптона, Великобритания

e-mail: prokopev.s@icmm.ru

Моделируется динамика вытеснения одной жидкости другой в капиллярных трубках, используя теорию фазового поля [1]. Корректное описание данной проблемы требует использования теоретической модели, которая учитывает межфазную диффузию. Для этого необходимо отслеживать эволюцию границы раздела двух жидкостей. Кроме этого, граница раздела фаз обладает поверхностным натяжением. Теория фазового поля позволяет учесть данные эффекты. Нами решались уравнения Кана-Хилларда-Навье-Стокса в приближении Буссинеска в переменных скорость-давление с помощью метода дробных шагов (метод проекций) в конечно-разностной постановке. Расчеты, проведенные для одиночного капилляра, согласуются с аналитическими выражениями для скорости кончика мениска и перепада капиллярного давления на границе раздела.

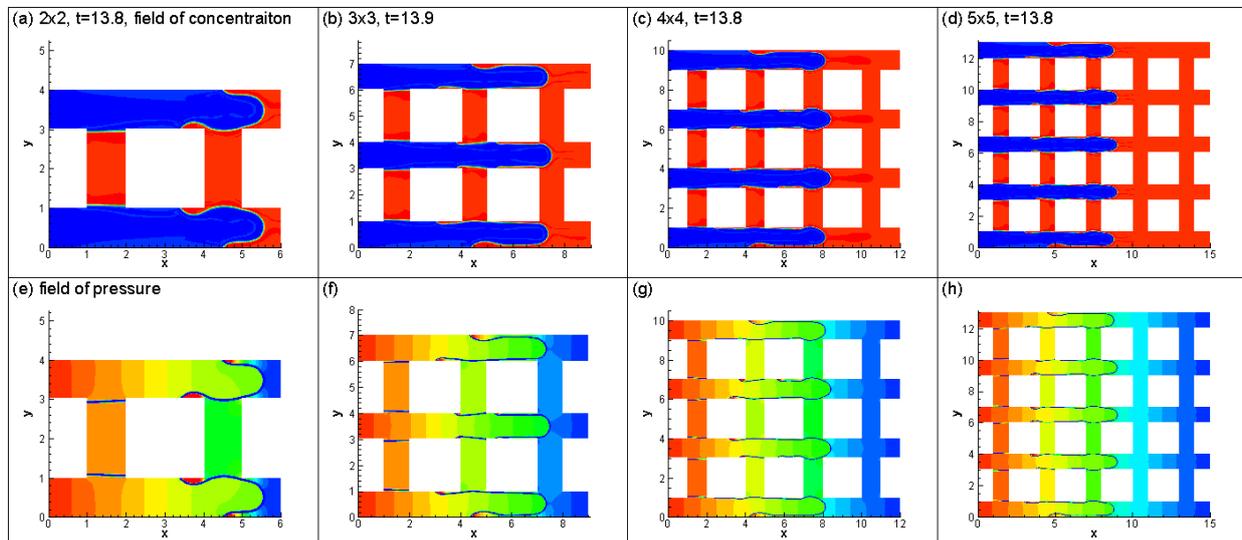


Рис. 1. Элемент матрицы капиллярных трубок. Примеры течений, a, b, c, d - поля концентрации, e, f, g, h - поля давления.

Обнаружено, что для всех рассмотренных конфигураций вытеснение проходит несколько стадий: 1) после установления формы мениска наблюдается поршневое распространение фронта вытеснения через матрицу; 2) когда мениски достигают выходного конца матрицы, некоторый объем вытесняющей жидкости все еще остается на стенках матрицы; 3) наконец, устойчивая стадия достигается, когда вытесненная жидкость все же остается в некоторых элементах матрицы, но дальнейшая перекачка вытесняющей жидкости не приводит к каким-либо различиям в распределении жидкостей в матрице. Показано также, что число Пекле определяет скорость скольжения границы раздела вдоль стен. Найдено, что все интегральные характеристики (включая капиллярное давление), которые характеризуют вытеснение жидкость-жидкость в матрицах разных размеров, сходятся к некоторым кривым, указывая на то, что матрица с размером менее 10x10 элементов достаточна для достаточно точного прогнозирования капиллярного давления в однородной пористой среде. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-01-00782) и Программы поддержки Научных школ Пермского края (грант № С-26/788).

1. S. Prokopev, A. Vorobev, T. Lyubimova, Phase-field modeling of an immiscible liquid/liquid displacement in a capillary, *Physical Review E*, 99(3), 033113, 2019

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОТОКОМ И ВОВЛЕЧЕНИЯ В ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА СКЛОНА

Д.И. Романова^{1,2}

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

²Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

e-mail: romanovadi@gmail.com

Потоки на склонах, такие как снежные лавины, грязекаменные сели, оползни, подводные мутьевые потоки, в процессе движения разрушают подстилающую поверхность и уносят массу вниз по течению. В случае селевых или подводных мутьевых потоков интерес представляет глубина разрушения склона, так как потоком могут быть разрушены элементы инфраструктуры, изменена форма русла. В случае снежных лавин разрушение подстилающей поверхности изучается для определения изменения массы потока, так как в процессе движения масса потока может измениться в несколько раз, это важно учитывать при проектировании заградительных сооружений.

Для моделирования разрушения потоком и вовлечения в движение материала склона используется многофазный подход. Методом контрольных объёмов рассчитывается движение 3 фаз: материал подстилающей поверхности, материал движущегося потока, воздух. Используется решатель `multiphaseInterFoam` пакета `OpenFOAM`. В качестве механизма захвата рассматривается захват при превышении напряжения на дне потока некоторого порогового значения, описанный в работах [1, 2]. Материал потока представлен средой Хершеля-Балкли, использование данного реологического закона позволяет смоделировать процесс отложения материала потока на поверхности склона, а также остановку потока.

Для верификации полученной модели течения рассчитывается снежная лавина в 22 очаге на горе Юкспор (Хибины). Последний раз катастрофическая лавина сошла здесь в 2017 году, тогда были засыпаны автомобильная и железная дороги, выбиты окна в близлежащем доме, погибли 3 человека. В работе используются данные о лавине из этого очага, сошедшей в 1965 году. Для этой лавины известна масса сорвавшегося снега и масса лавинных отложений, что позволяет оценить количество захваченного потоком материала.

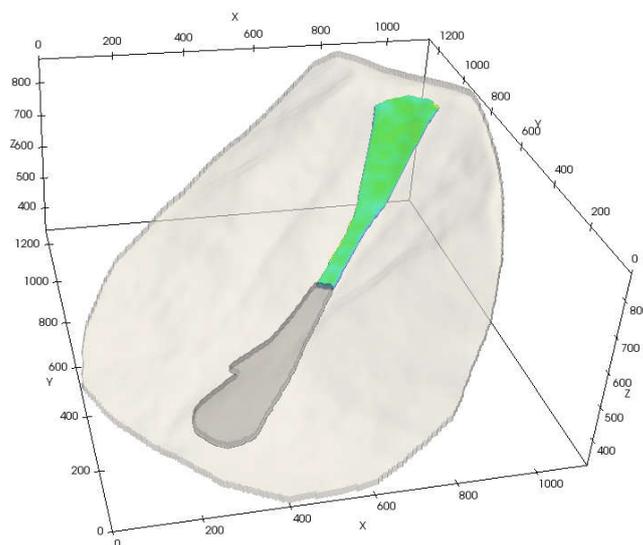


Рис. Склон 22 лавинного очага горы Юкспор (Хибины). Зелёным цветом показана зона зарождения лавины, тёмно-серым – зона лавинных отложений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90105.

1. M.E. Eglit , K.S. Demidov. Mathematical modeling of snow entrainment in avalanche motion. Cold Regions Science and Technology, 43(1):10 – 23, 2005. Snow and Avalanches.

2. M.E. Eglit , A.E. Yakubenko. Numerical modeling of slope flows entraining bottom material. Cold Regions Science and Technology, 108:139–148, 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО ТЕЛА С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ СНЕЖНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Д.И. Романова^{1,2}, С.В. Стрижак¹

¹ Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

² Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: romanovadi@gmail.com

В работе изучается движение снежных кристаллов в потоке и их налипание на поверхность обтекаемого модельного тела. Моделирование обледенения очень важно для изучения таких опасных природных явлений как обледенение деревьев, зданий, линий электропередач, элементов самолетов и ветроустановок.

В данной работе рассматривается задача о внешнем обтекании потоком воздуха с кристаллами снега модельного тела в форме цилиндра радиуса $R=10$ см.

В работе используется Эйлер-Лагранжев подход и сопряженный метод на базе метода контрольного объема и метода дискретных элементов. Используется модель взаимодействия частиц Джонсона-Кендалла-Робертса [1]. Данная модель позволяет моделировать когезию частиц и их адгезию к модельному телу, что определяет характер обледенения. Для моделирования задавались механические свойства частиц (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент упругого восстановления, коэффициент трения скольжения), соответствующие свойствам снежных кристаллов [2]. В расчёте частицы имеют сферическую форму и разные диаметры.

Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами $5 \times 1 \times 1$ м³. Количество расчетных ячеек для CFD расчета составило 1000. Плотность частиц в расчетной области задавалась равной 500 шт./м³.

Скорость потока на входе расчетной области варьировалась от 10 до 20 м/с, число Рейнольдса по диаметру частицы порядка $Re_p=1000$. Расчеты проводились с помощью программ CFDEM Coupling и YADE.

Время счета процесса обледенения составило $t = 100$ секунд. Расчеты проводились на вычислительном кластере UniHUB лаборатории UniCFD ИСП РАН.

В дальнейшем планируется использовать данный подход для моделирования обледенения тел более сложной формы (крыло самолета, воздухозаборник двигателя).

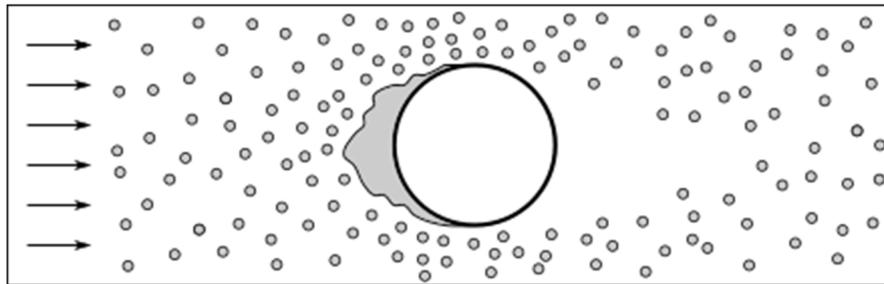


Рис. Схема задачи обледенения цилиндра

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13016.

1. Liz Ivoneth Del Cid. A discrete element methodology for the analysis of cohesive granular bulk solid materials. PhD thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, United States, 2015.

2. Anders Lind. DEM Modeling of Snow-Wall Adhesion. Development of a particle stick or bounce regime map for prediction of snow accumulation on cars. PhD thesis, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ NaCl И KCl ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ПЛАСТИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

К.А. Рыбкин¹, О.О. Фатталов¹, Т.П. Любимова^{1,2}, Л.О. Филлипов²

¹ Физический факультет ПГНИУ, Пермь

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: k.rybkin@gmail.com

В настоящей работе экспериментально исследована динамика парогазовых пузырьков, возникающих в воде и водно-солевых растворах в результате коалесценции кавитационных пузырьков, образующихся под действием ультразвука (УЗ), вблизи твердых поверхностей [1] с различными свойствами.

В экспериментах использовалась кювета, имеющая форму параллелепипеда, с размерами $110 \times 116 \times 160$ мм³ (Рис. 1. А). Кювета была изготовлена из оргстекла толщиной 3мм. В центральной части кюветы строго вертикально закреплялись пластины, изготовленные из стекла, тефлона и оргстекла. Для визуализации пузырьков использовался лазерный нож, создаваемый цилиндрической линзой и зеленым лазером KLM 532. Для регистрации динамики пузырьков использовалась высокоскоростная камера Basler A504кс и зеркальная камера Nikon D7200, подробно методика описана в статье [2].

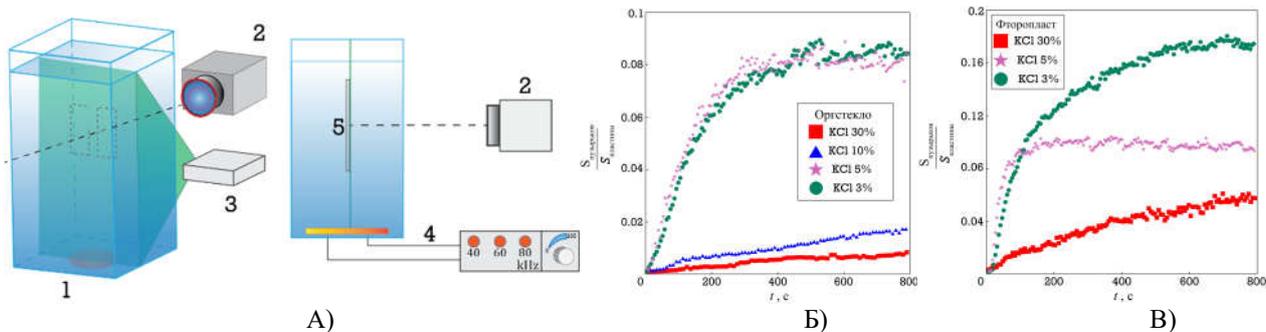


Рис. 1. А) Лабораторная установка: 1) кювета $110 \times 116 \times 160$ мм³; 2) высокоскоростная камера, 3) лазер, 532 нм; 4) источник ультразвука, $f = 40$ кГц, $P = 100$ Вт; 5) исследуемые пластины.

Зависимость относительной площади поверхности (А - оргстекла, Б - тефлона) покрытой пузырьками от времени, при различной концентрации солей.

Эксперименты показали значительное влияние концентрации соли в воде и свойств твердой поверхности на поведение пузырьков, как при действии УЗ, так и после его отключения. В 20% водном растворе NaCl при действии УЗ на гидрофильную поверхность стекла, пузырьки оставались неподвижными, а в момент отключения УЗ всплывала лишь незначительная их часть. При аналогичных условиях на гидрофобной поверхности фторопласта наблюдаются подвижные пузырьки, всплывающие при отключении УЗ. Эксперименты показали, что в случае гидрофильной поверхности, при концентрации соли в растворах около 3%, суммарная площадь пузырьков, прикрепившихся к твердой поверхности, растет, со временем, нелинейно. В случае гидрофобной поверхности линейный рост наблюдается лишь при 30% концентрации KCl (Рис. 1. Б, В).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

1. Lyubimova T. P. et al. Dynamics of Vapor-Gas Bubbles in a Liquid Near Solid Surfaces with Different Properties //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. Т. 581. №. 1. С. 012041.

2. 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.

БИГАРМОНИЧЕСКИЕ АТТРАКТОРЫ

Д.А. Рязанов^{1,2}, М.И. Провидухина³

¹Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: ryazanov@ispras.ru

В мировой океан со стороны солнца и луны постоянно поступает механическая энергия за счет приливного воздействия. Ранее были проведены исследования эффекта аккумуляции кинетической энергии стратифицированной жидкости, возникающих из-за особых свойств дисперсионного соотношения внутренних гравитационных волн при монохроматическом воздействии [1]. Области аккумуляции кинетической энергии характеризуются повышенной скоростью движения жидкости и называются аттракторами. Аттракторы являются распространенным явлением в океане и любых стратифицированных жидкостях [2]. Это явление очевидно оказывает значительное влияние на перемешивание, траекторию движения живых организмов, седиментацию и эрозию поверхностей, с которыми они взаимодействуют. Следует отметить, что появление аттракторов присуще не только стратифицированным жидкостям, но и вращающимся.

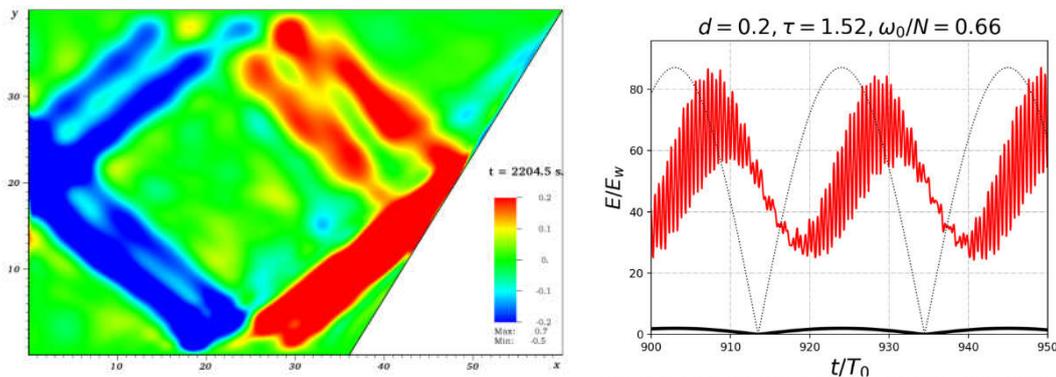


Рисунок 1. Вертикальная компонента скорости (слева) и динамика средней кинетической энергии (справа) при бигармоническом воздействии на стратифицированную жидкость.

Моделирование аттракторов внутренних гравитационных волн на простой геометрии не требует больших вычислительных затрат и позволяет установить характерные режимы течения, оценить потенциал аккумулируемой энергии и проанализировать спектр компонент скорости [3].

В отличие от предыдущих работ, авторами численно получена картина течения стратифицированной жидкости в трапециевидном резервуаре с волнопродуктором воздействующим на жидкость двумя монохроматическими колебаниями (Рис. 1). Проведен анализ результатов прямого численного моделирования бигармонических аттракторов внутренних волн методом спектральных элементов. Исследован спектр вертикальной компоненты скорости, получена его частотно-временная характеристика и средняя кинетическая энергия в резервуаре в зависимости от времени.

1.N. Sibgatullin, E. V. Ermanyuk, K. A. Vatutin, D. A. Ryazanov, and X. Xu. Numerical simulation of three-dimensional wave attractors. The XXVII workshop of the Council of nonlinear dynamics of the Russian Academy of Sciences, 47(1):112–115, 2019.

2.Guo, Y., & Holmes-Cerfon, M. (2016). Internal wave attractors over random, small-amplitude topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 787, 148-174. doi:10.1017/jfm.2015.648

3.C. Brouzet, E. V. Ermanyuk, S. Joubaud, I. Sibgatullin, and T. Dauxois. Energy cascade in internal-wave attractors. *Europhysics Letters*, 113:44001, 2016.

ВОЛНЫ В ЦЕНТРИФУГИРОВАННОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ ФЛОТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ, НЕРАВЕНСТВА И СОБСТВЕННЫЕ ФУНКЦИИ ОПЕРАТОРА РОТОР

И.Н. Солдатов^{1,2}, М.А. Свешиникова¹, Д.А. Симакин¹

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

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

e-mail: igorsldtv@yandex.ru

Исследуются основные свойства инерционных (гироскопических) волн во флотирующей вязкой жидкости, образующей центрифугированный слой на твердой стенке цилиндрической полости центрифуги (см. рис.). Наиболее детально рассмотрены азимутальные гироскопические волны. Флотирующая жидкость – это жидкость с инерционной поверхностью, образуемой плавающими на её свободной поверхности и не взаимодействующими между собой частицами, обладающими малой массой. Её движения описываются обычными уравнениями гидродинамики (за исключением того, что в правой части уравнения движения появляются два члена, связанные с действием кориолисовой и центробежной сил, поскольку рассмотрение ведется в неинерциальной системе отсчёта)

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

(μ – динамическая вязкость, $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость центрифуги, остальные обозначения стандартны), но граничные условия на свободной поверхности являются неклассическими

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{T},$$

где $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + 2E\mathbf{e}$, $\mathbf{e} = (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)/2$, $\mathbf{n} = \nabla h / |\nabla h|$, E – число Экмана, $h(t, \mathbf{x}) = 0$ – уравнение свободной поверхности, \mathbf{T} – вектор, определяющий реакцию частиц инерционной поверхности, в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\mathbf{T} = (\delta h + P[2h + \partial u / \partial t - 2v], P[2u - \delta h / \partial \varphi + \partial v / \partial t], P[-\delta \delta h / \partial z + \partial w / \partial t]), \quad \mathbf{v} = (u, v, w).$$

В отличие от традиционного подхода с применением погранслоевых функций при решении задач с малым параметром при старших производных, мы ищем не приближенное, а точное решение гидродинамической задачи. Для построения решения используется суперпозиция собственных функций несамосопряженного оператора rot. Собственные вектор-функции $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ оператора в пространстве соленоидальных полей, определяются из несамосопряженной задачи на собственные значения в двусвязной области. Получено и исследовано дисперсионное уравнение. Показано, инерционная поверхность оказывает дестабилизирующее действие. Получены оценки параметров, при которых стационарное движение жидкости является устойчивым.

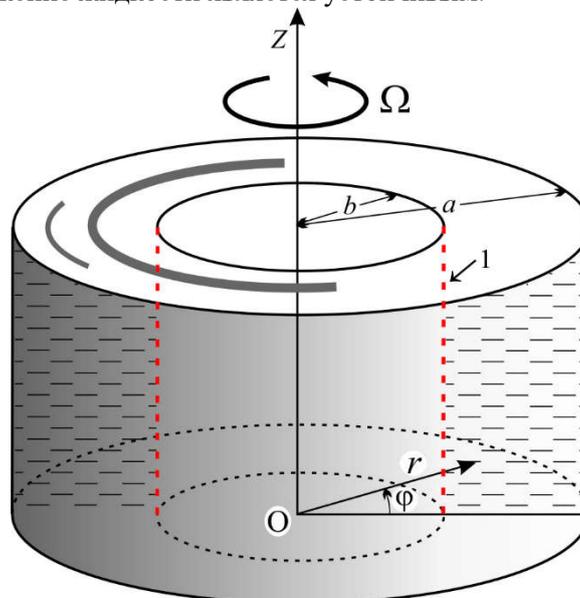


Рис. Вязкая жидкость образует центрифугированный слой на стенке цилиндрической полости центрифуги. Красным выделена инерционная свободная поверхность жидкости.

1.Soldatov I.N., Klyueva N.V. Waves in a Centrifuged Layer of a Rotating Viscous Fluid with an Inertial Surface //Mathematical Models and Computer Simulations, 2020, Vol. 12, No. 12, pp. 27-35.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА ПРИ НЕКОТОРЫХ НАСЛЕДСТВЕННЫХ КАРДИОМИОПАТИЯХ

Ф.А. Сёмин^{1,2}, А.Р. Хабибуллина³, А.К. Цатурян¹

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

²Российский университет дружбы народов, Москва

³Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: f.syomin@imec.msu.ru

В основе сокращения сердца лежат сложные взаимосвязанные процессы различной природы, протекающие на уровнях одиночной клетки сердечной мышцы, ткани и целого органа. Для понимания механизмов этих процессов, их взаимосвязей и причин нарушений в работе сердца, полезны математические модели, которые могли бы лечь в основу систем диагностики сердечных заболеваний и оценки эффективности их лечения. Для этого модели должны детально описывать механизмы работы сердца и быть относительно простыми с вычислительной точки зрения.

В докладе представлена математическая модель сердечно-сосудистой системы с многомасштабным описанием левого желудочка сердца (ЛЖ) [1]. Это описание основано на подробной клеточной модели сокращения сердечной мышцы и его регуляции, задаваемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений [2]. С помощью этой модели мы исследовали два типа наследственных кардиомиопатий, вызванных мутациями в одном из регуляторных белков сердечной мышцы. Каждая из мутаций приводила к нарушению сократительных и регуляторных свойств миокарда на клеточном уровне и изменению формы (ремоделированию) ЛЖ: концентрической гипертрофии (утолщению стенок желудочка) или дилатации (увеличению объёма полости желудочка). Мы опирались на клинические данные, полученные на клетках и сердцах пациентов с этими мутациями. Одна из них, ассоциированная с гипертрофической кардиомиопатией, вызывала существенное падение максимальной силы, развиваемой одиночным волокном мышцы, рост чувствительности силы к внутриклеточной концентрации ионов кальция и подавление зависимости такой чувствительности от длины волокон. Другая мутация, ассоциированная с дилатационной кардиомиопатией, вызывала падение кооперативности активации (наклона стационарных кривых кальций-сила) и снижение чувствительности сокращения к кальцию. Описание процессов регуляции сокращения клетки в нашей модели позволило нам численно исследовать влияние эффектов указанных мутаций на характеристики сердца как насоса. Расчёт сердечного цикла с учётом изменения формы ЛЖ выявил компенсаторные эффекты подобного ремоделирования.

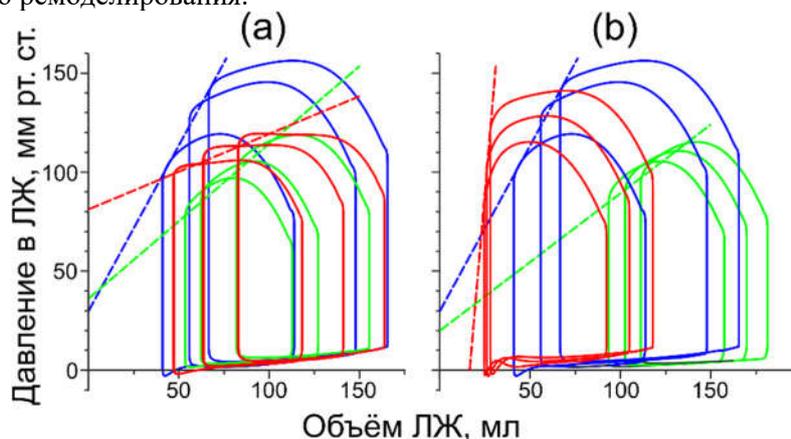


Рис. Петли давление-объём для ЛЖ в норме (синий) и при гипертрофической (красный) и дилатационной (зелёный) кардиомиопатических мутациях. Расчёты приведены без учёта ремоделирования ЛЖ (a) и с его учётом (b).

Работа поддержана грантами РФФИ 18-31-00065 и 17-00-00066.

1. Syomin F.A., Zberia M.V., Tsaturyan A.K. Multiscale simulation of the effects of atrioventricular block and valve diseases on heart performance // *Int J Numer Methods Biomed Eng.* 2019. V. 35(7):e3216.
2. Syomin F.A. and Tsaturyan A.K. A simple model of cardiac muscle for multiscale simulation: Passive mechanics, crossbridge kinetics and calcium regulation // *J Theor Biol.* V. 420. P. 105–116.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПАССИВНОЙ ЖЁСТКОСТИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА, ВЫЗВАННОГО ЕГО РЕМОДЕЛИРОВАНИЕМ ПРИ КАРДИОМИОПАТИЯХ

Ф.А. Сёмин^{1,2}, А.Р. Хабибуллина³, А.Ш. Осепян^{1,3}, А.К. Цатурян¹

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

²Российский университет дружбы народов, Москва

³Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: f.syomin@imec.msu.ru

Пассивный миокард часто рассматривают как трансверсально-изотропную среду. Изотропная компонента жёсткости обусловлена, в основном, внеклеточными структурами, а анизотропная, действующая только вдоль мышечных волокон, – длинным упругим белком титином. Данные, полученные на образцах сердечной мышцы и интактном сердце, демонстрируют изменение пассивной жёсткости миокарда в стенках камер сердца у пациентов с гипертрофической и дилатационной кардиомиопатиями. Показано [1] существенное снижение жёсткости миокарда при дилатации желудочка сердца (ЛЖ), которое коррелирует с изменениями экспрессии изоформ титина. Имеются данные [2,3] об ужесточении миокарда пациентов и животных с концентрической гипертрофией. Результаты экспериментов на одиночных клетках ЛЖ мышей [2] свидетельствуют об анизотропном ужесточении миокарда вдоль направления волокон, а неинвазивные измерения на интактном сердце человека [3] показали рост изотропной жёсткости у пациентов с гипертрофией ЛЖ.

В докладе представлены результаты применения нашей модели сердечно-сосудистой системы с подробным описанием механики ЛЖ [4] для исследования эффектов изменения пассивной жёсткости миокарда. Мы настраивали модель для описания влияния двух мутаций, вызывающих наследственные кардиомиопатии и сопутствующее им ремоделирование: гипертрофию ЛЖ в одном случае и дилатацию в другом. Результаты расчётов показали, что изменение жёсткости миокарда обеспечивает незначительную компенсацию снижения сократительных свойств мышцы при дилатационной кардиомиопатии и, наоборот, ухудшает производительность сердца при гипертрофической кардиомиопатии.

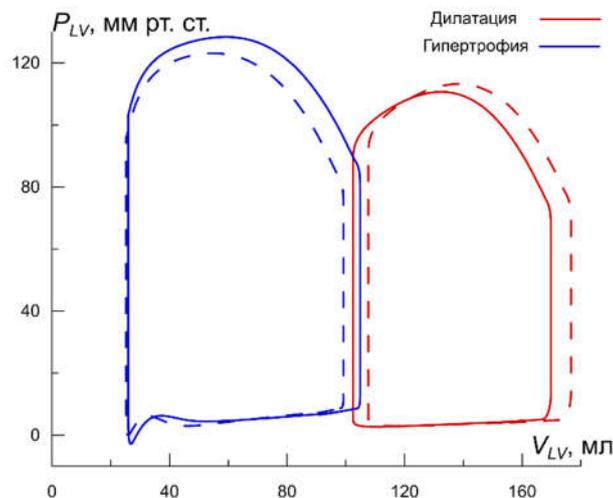


Рис. Петли давление-объём для ЛЖ при его гипертрофии (синий) и дилатации (красный) с «нормальной» (сплошная) и изменённой (штрих) жёсткостью.

Работа поддержана грантами РФФИ 18-31-00065 и 17-00-00066.

1. Nagueh S.F. et al. Altered titin expression, myocardial stiffness, and left ventricular function in patients with dilated cardiomyopathy // *Circulation* 2004. V. 110, P. 155–162.
2. Røe Å.T. et al. Increased passive stiffness promotes diastolic dysfunction despite improved Ca^{2+} handling during left ventricular concentric hypertrophy // *Cardiovasc. Res.* 2017. V. 113, P. 1161–1172.
3. Villemain O. et al. Myocardial Stiffness Evaluation Using Noninvasive Shear Wave Imaging in Healthy and Hypertrophic Cardiomyopathic Adults // *JACC Cardiovasc. Imag.* 2019. V. 12, P. 1135–1145.
4. Syomin F.A., Zberia M.V., Tsaturyan A.K. Multiscale simulation of the effects of atrioventricular block and valve diseases on heart performance // *Int J Numer Methods Biomed Eng.* 2019. V. 35(7):e3216.

АККУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ВНУТРЕННИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН В ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕЖИМАХ

И.Н. Сибгатуллин^{1,2}, С.А. Елистратов³, К.А. Ватутин^{2,3}, Е.В. Ерманюк⁴

¹Институт океанологии РАН им. П.П.Ширшова, Москва

²Институт системного программирования им. В.П.Иванникова РАН, Москва

³МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

⁴Институт гидродинамики им М.А.Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: sibgat@ocean.ru

Гравитационно-инерционные волны играют существенную роль в формировании абиссального профиля плотности океана и могут переносить порядка 1 Тв энергии от глобальных баротропных приливов к мелкомасштабным [1]. За исключением отдельных конфигураций топографии дна и характеристик профилей солености и температуры, глубинное волновое движение является турбулентным или стохастическим. В последние годы активно развиваются исследования аккумуляции волновой энергии за счет фокусировки волн на определенных путях вследствие специфического закона отражения от наклонных поверхностей. В общем случае в стратифицированной жидкости, заполняющей область с наклонными границами, формируется волновой аттрактор, ширина которого определяется вязкостью. При этом средняя кинетическая энергия может возрасти в десятки раз. Ламинарный волновой аттрактор виден невооруженным взглядом как в экспериментах, так и при численном моделировании [2-4]. Этого нельзя сказать про турбулентные режимы, возникающие из волновых аттракторов после каскада неустойчивостей. Здесь волновой аттрактор на первый взгляд не проявляется, а во всей области наблюдается турбулентное движение, характерные масштабы которого могут изменяться. Однако наше исследование показало, что особенно в областях с большим аспектным соотношением, турбулентные режимы даже после каскада неустойчивостей продолжают насыщаться от линейного механизма фокусировки пучков волн. Причем конечный спектр турбулентного движения сильно отличается в областях с малым, и с большим аспектным соотношением: в случае малого аспектного соотношения доминирует каскад триадных субгармонических неустойчивостей [4], в то время как для большого аспектного соотношения доминирует супергармонические частоты, кратные целой и половинной частотам внешнего воздействия. Данный результат важен для анализа спектров волновой турбулентности в различных областях мирового океана.

Исследование проводится при поддержке гранта РФФ19-11-00169.

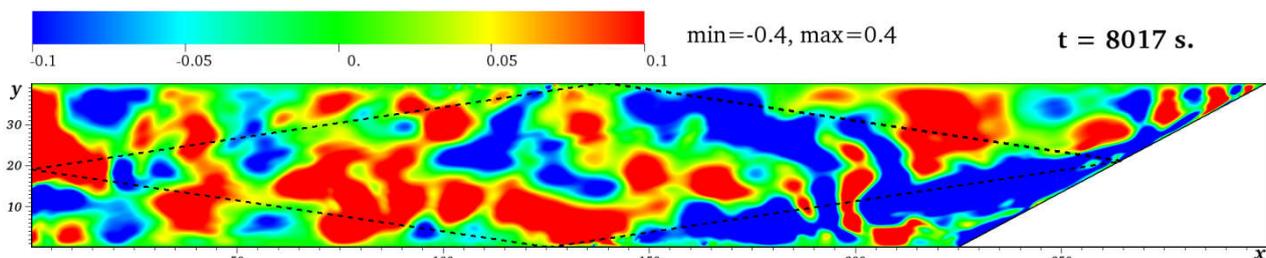


Рис.1. Типичная картина волновой турбулентности после каскада неустойчивостей волнового аттрактора (пунктирная линия).

1. Garrett, C. & Kunze, E. 2007 Internal tide generation in deep ocean. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 39, 57–87.
2. И. Н. Сибгатуллин and Е. В. Ерманюк. Аттракторы внутренних и инерционных волн (обзор). *Прикладная механика и техническая физика*, (2):113–136, 2019.
3. Ilias Sibgatullin, Evgeny Ermanyuk, Leo Maas, Xu Xiulin, and Thierry Dauxois. Direct numerical simulation of three-dimensional inertial wave attractors. *IEEE Conference Proceedings*, page 17526262, 2017.
4. С. Brouzet, I. N. Sibgatullin, H. Scolan, E. V. Ermanyuk, and T. Dauxois. Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, 793:109–131, 2016.

ОПТИМИЗАЦИЯ УСИЛИЯ ОСЕВОГО АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА НАСОСА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

С.В. Скорюков¹, А.М. Гуськов^{1,2}

¹Факультет «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

²ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва

e-mail: ssv500@yandex.ru

Искусственный желудочек сердца (ИЖС) находит применение в терапии сердечной недостаточности терминальной стадии. Роль рабочего звена ИЖС, непосредственно обеспечивающего транспорт крови в обход желудочка сердца, играет насос вспомогательного кровообращения (НВК). В настоящее время наблюдается тенденция по переходу от традиционных подшипниковых узлов скольжения к магнитному подвесу. Данный переход связан с уменьшением гемолиза крови, потерь мощности насоса и риска тромбообразования при использовании магнитного подвеса [1].

Магнитный подвес должен обеспечивать контролируруемую динамику рабочего колеса (РК) при действии внешних сил, имея при этом минимально возможные габариты. Применительно к проектированию НВК внешние силы обусловлены набегающим потоком крови. В работе [2] представлена оценка действующих на рабочее колесо гидродинамических сил, которая получена посредством решения стационарной CFD-задачи.

В данной работе рассмотрен осевой тип НВК. Его вид в разрезе с указанием характерных элементов приведён на рисунке. Согласно выбранной схеме, поток крови набегаёт вдоль оси насоса на его составляющие, расположенные в проточной части: спрямляющий аппарат (СА), рабочее колесо и диффузор. Лопастей РК условно не показаны. РК приводится во вращение электродвигателем, его положение контролируется магнитным подвесом. Здесь и далее подразумевается именно активный магнитный подвес (АМП). АМП установлен в торцевые части СА и диффузора.

Для конструирования конфигурации магнитного подвеса применена методика, изложенная в [3]. Определены число витков в катушке АМП, сила тока, осевое усилие

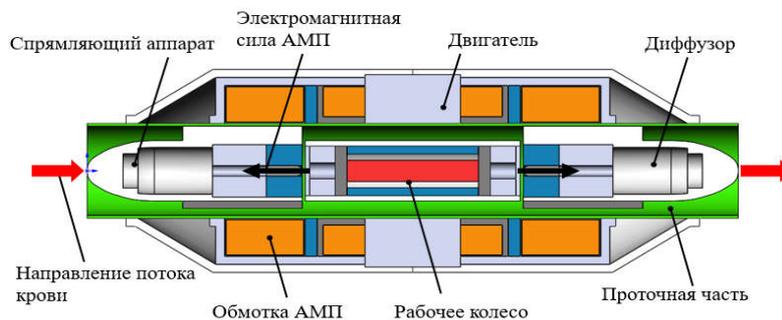


Рис. Схема НВК в разрезе с указанием основных функциональных элементов и электромагнитной силы АМП.

Для уточнения характерных размеров разрабатываемой конфигурации решена задача оптимизации по критерию минимума геометрических параметров при выполнении требования по осевой нагрузке. Варьируемыми параметрами представлены геометрические размеры, число витков, сила тока. Для достижения цели была построена конечноэлементная модель АМП. На её основе решена задача расчёта распределения магнитного поля АМП и генерируемых сил в стационарной постановке, а также проведена оптимизация по обозначенному выше списку параметров. Результат работы выражен определёнными из анализа оптимальными характеристиками АМП в составе НВК.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90051.

1. Hoshi H., Shinshi T., Takatani S. Third-generation blood pumps with mechanical noncontact magnetic bearings // *Artificial organs*. 2006. Т. 30. №. 5. С. 324-338.

2. Скорюков С.В., Киселёв В.В., Крупнин А.Е., Банин Е.П., Гуськов А.М., Сорокин Ф.Д. Оценка гидродинамических сил на импеллере осевого насоса вспомогательного кровообращения с применением методов вычислительной гидродинамики // *МИКМУС-2019* (Москва, 4-6 декабря 2019). – М: Изд-во ИМАШРАН. 2020. С. 406-409.

3. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение. СПб: Политехника, 2003. 206 р.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ В РАМКАХ OPENFOAM® V1912

Т.В. Стенина^{1,2}, А.В. Иванов^{2,3}

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²ИСП РАН им. В.П. Иванникова, Москва

³ИПМ РАН им. М.В. Келдыша, Москва

e-mail: TatianaSt@ispras.ru, av.ivanov@ispras.ru

Инструкторы: Татьяна Стенина, Иванов Александр

Программный стек: OpenFOAM v1912

Разработчики этой сессии: Т.В. Стенина, А.В. Иванов, М.В. Крапошин, И.Н. Сибгатуллин

Сайт команды разработчиков: <https://github.com/unicfdlab>

Одним из методов численного моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости связан с использованием регуляризованных уравнений гидродинамики, которые представляют собой обобщение уравнений Навье-Стокса в рамках квазигидродинамического подхода. Данное направление имеет широкий спектр практического применения, а также большой исследовательский потенциал. Для удобной работы с регуляризованными уравнениями была реализована библиотека КГД/КГД методов на базе открытой платформы OpenFOAM.

В данном учебном треке рассматриваются две программы реализации КГД численных алгоритмов - решатели QHDFoam и particlesQHDFoam. QHDFoam построен на базе квазигидродинамических уравнений и предназначен для моделирования несжимаемых течений с учетом плавучести и вязкости. Поскольку решатели разработаны на базе открытой библиотеки OpenFOAM, они подходят для решения задач со сложной, криволинейной геометрией.

Решатель particlesQHDFoam предназначен для моделирования трёхмерного нестационарного турбулентного течения несжимаемой жидкости совместно с движением потока частиц. Решение системы уравнений гидродинамики осуществляется с применением квазигидродинамического подхода, к которому добавляется модуль OpenFOAM для расчёта перемещения частиц.

Цель данного учебного трека – рассказать об особенностях и возможностях представленных решателей, дать навыки работы с ними работать на тестовых примерах.

Будут затронуты следующие вопросы:

- описание базовых принципов работы решателей;
- настройка входных параметров;
- запуск численных расчетов на тестовых примерах.

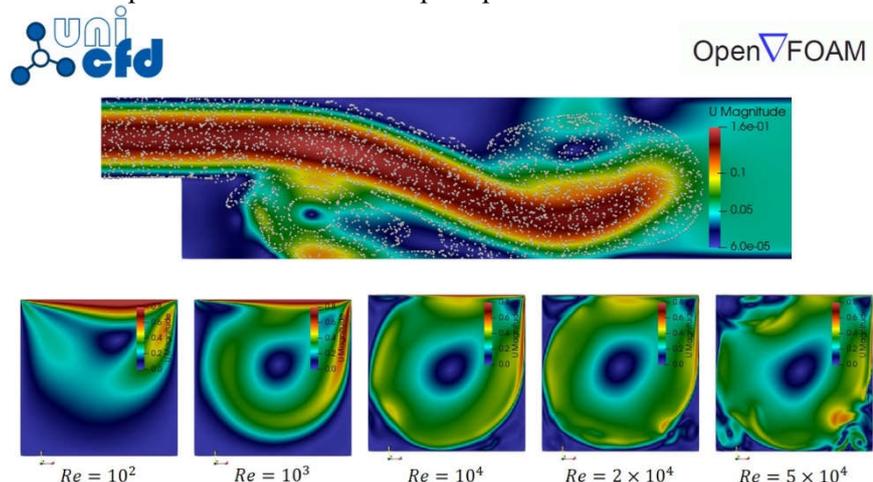


Рис. Примеры тестовых расчетов в открытом пакете OpenFOAM v1912.

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 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. Istomina «Development of OpenFOAM solver for compressible viscous flows simulation using quasi-gas dynamic equations». DOI: [10.1109/ISPRAS.2017.00026](https://doi.org/10.1109/ISPRAS.2017.00026).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ В ЛАМИНАРНЫХ ПОТОКАХ В СТЕКЛЯННЫХ КАНАЛАХ

Ф. О. Султанов^{1,2}, И. Б. Быхало¹, А. А. Левченко¹

¹Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская область

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Московская область

e-mail: sultanov@issp.ac.ru

Исследование течений в трубках и каналах маленького размера в последнее время представляет все больший интерес в различных сферах. Уменьшение размеров трубок и каналов привело к созданию так называемых микрофлюидных устройств.

Исследования проводились в стеклянных каналах Т-типа. На предметный столик оптического микроскопа помещался канал. К входным отверстиям подводились два гибких тефлоновых капилляра, по одному из которых пускался раствор родамина в воде, а по второму дистиллированная вода. Для регистрации эксперимента была установлена тушка беззеркальной камеры с помощью которой производились снимки через объектив микроскопа. Полученные изображения обрабатывались с помощью различных графических редакторов и пакета прикладных программ Matlab [1].

Для определения зависимостей распределений концентрации раствора в потоке поперек канала, брались профили интенсивности изображения в срединной области каждого участка канала. Профиль интенсивности получался в виде сигмоиды, что неплохо согласуется с [2]. Чем дальше от начала соединения, тем переходная область сигмоиды становится плавнее, а разность значений интенсивности уменьшается.

Для наглядности были взяты семь равномерно удаленных поперечных профилей интенсивности по длине канала. Видно, как изменяется наклон кривой по мере удаления потока от места соединения.

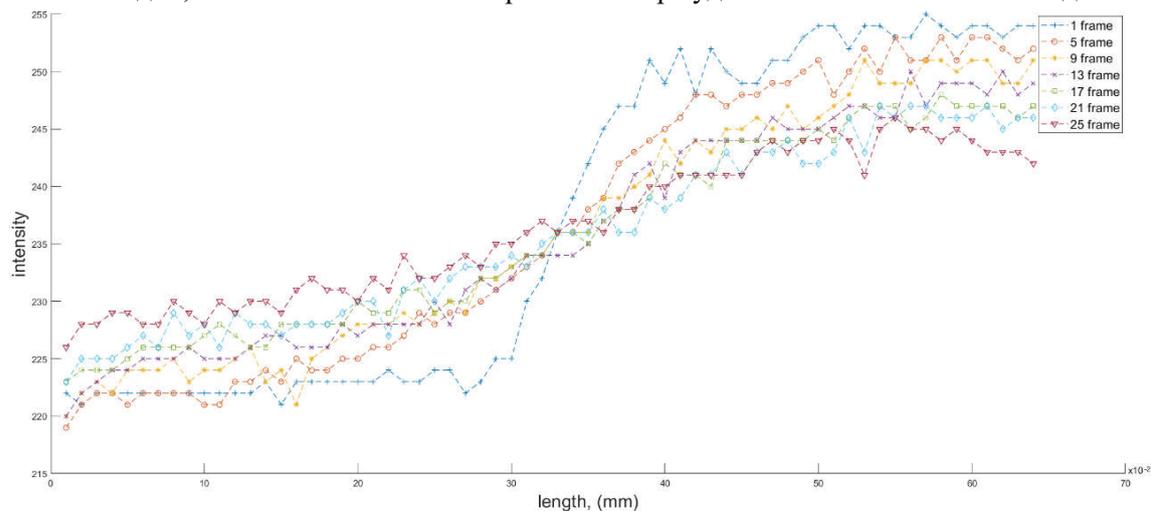


Рис. Профили интенсивности.

Начальная концентрация Родамина Ж в воде составляла $\sim 6,3 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$. Коэффициент диффузии Родамина в воде равен $\sim 4,4 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$. Исходя из этих данных, а также значений параметров размера канала и скорости потока, была построена аналитическая модель зависимости интенсивности от ширины канала на разных участках, которая находится в хорошем качественном согласии с экспериментальными результатами.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ №075-15-2019-1893.

1. F O Sultanov et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1560 012044.
2. Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики 1969.

РЕГИСТРАЦИЯ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В ОБЪЕМЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫМИ ЗАРЯДАМИ

М.Р.Султанова^{1,2}, И.А.Ремизов^{1,2}

¹Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл.

²Институт теоретической физики им Л.Д.Ландау РАН, Черноголовка, Московская обл.

E-mail: mabinkaiftt@issp.ru

Вихревое движение может быть создано волнами на поверхности жидкости. При движении двух неколлинеарных волн под углом друг к другу формируется решетка вихрей [1]. Первоначально эксперименты по генерации вихрей волнами проводились на воде. Однако в природе, помимо классических жидкостей, существуют и квантовые жидкости, в которых вихревое движение квантовано. К таким жидкостям относится гелий-4 при температуре ниже 2,17 К. При температурах около 1,3 К плотность сверхтекучей компоненты доминирует. Инжектированные заряды являются хорошими пробными частицами для изучения вихревых течений в сверхтекучей жидкости, поскольку они взаимодействуют с квантовыми и нормальными вихрями [2].

Основной целью данной работы является изучение формирования квантовых вихревых структур поверхностными волнами в широком диапазоне температур, а также изучение эволюции вихревых структур при изменении условий накачки волн. Исследования проводились в гелиевой ячейке, находящейся в гелиевом криостате. В ходе эксперимента измерялся ток, приходящий на сборный коллектор. Волны на поверхности возбуждались двумя перпендикулярными плунжерами.

Чтобы оценить поведение вихревой структуры после отключения накачки, мы измерили временную зависимость величины общего тока, поступающего на все 5 сегментов. Точки на рисунке демонстрируют результаты измерений, выполненных через 0, 5, 10, 15, 35, 45 минут после выключения откачки. Видно, что суммарный ток линейно увеличивается со временем примерно на 30%. Можно предположить, что доля зарядов не достигла коллекторов из-за взаимодействия с вихрями. По-видимому, в результате взаимодействия заряды могут отклоняться от прямой траектории и перемещаться к боковым граням.

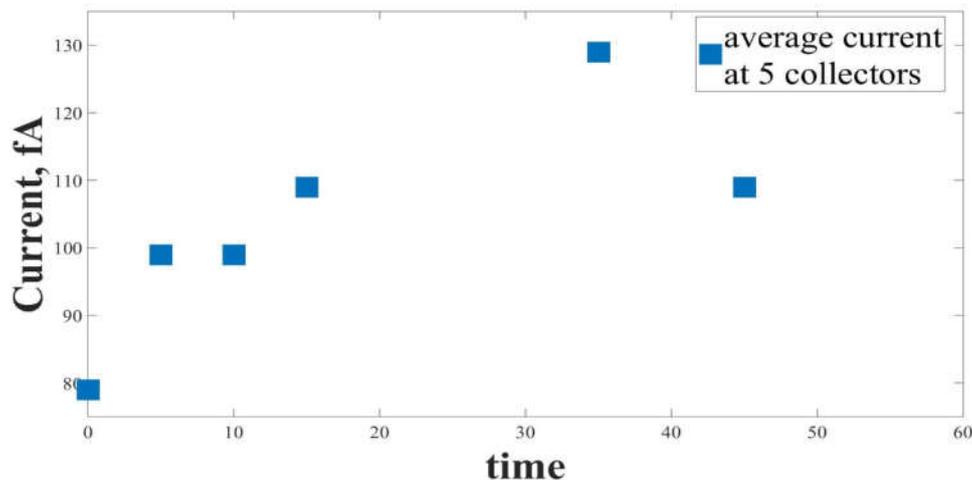


Рис. Зависимость суммарного тока от времени. $U_{\text{ours}}=350\text{В}$, $U_{\text{side1}}=6\text{В}$, $U_{\text{side2}}=6\text{В}$, $U_{\text{up}}=5\text{В}$, $U_{\text{down}}=25\text{В}$, $\text{Freq}=13\text{Гц}$, $A=10\text{В}$, $\Delta\phi = 90^\circ$.

Разработан метод исследования поведения вихревой системы в сверхтекучем гелии-4 с помощью инжектированных зарядов. Первые эксперименты показывают, что волны на поверхности сверхтекучего гелия генерируют вихри, которые проникают в объем. В будущих экспериментах мы планируем более детально изучить взаимодействие зарядов с квантовыми вихрями.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ №075-15-2019-1893.

1. S.V. Filatov, V.M. Parfenyev, S.S. Vergeles, M.Y. Brazhnikov, A.A. Levchenko, V.V. Lebedev // Physical Review Letters. – 2016. – V. 116. – I. 5. – P. 054501.

2. P. M. Walmsley, A. I. Golov, H. E. Hall, A. A. Levchenko, and W. F. Vinen, PRL 99, 265302 (2007).

ДЕТОНАЦИЯ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ПАДАЮЩЕЙ НА ГАЗОВУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

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 молярной массы моделируется взаимодействие ударной волны в горючем газе с эллипсоидальным пузырем инертного газа повышенной плотности в двумерной постановке. Рассмотрены различные числа Маха M падающей волны и отношения длин полуосей пузыря. Для численного моделирования применяется конечно-объемный метод типа С.К. Годунова второго порядка аппроксимации, включающий HLLC-решатель локальных задач о распаде разрыва. 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 (рис. 1, слева), а для еще более слабых – в области фокусировки поперечных скачков вблизи подветренного полюса пузыря (рис. 1, справа).

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 Совета по грантам президента РФ (МК-3012.2019.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (18-01-00793).

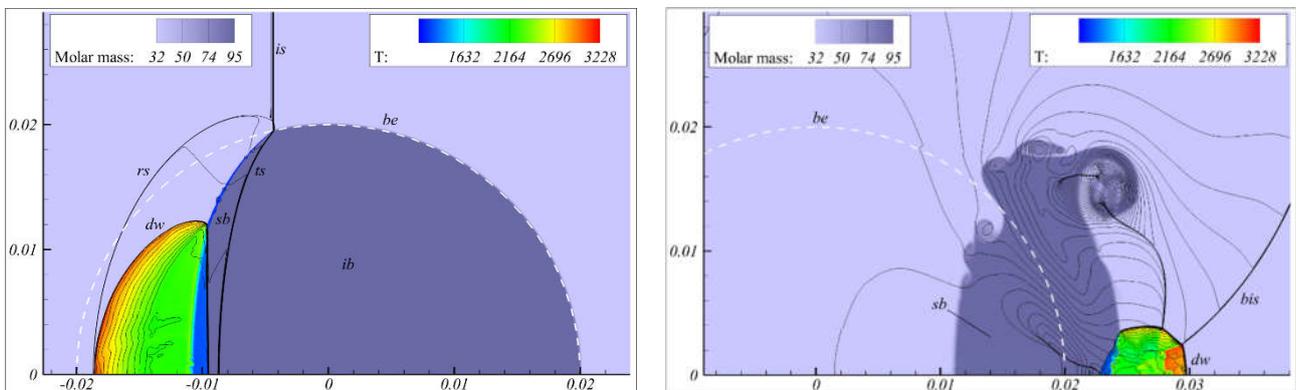


Рис. 1. Воспламенение горючей газовой смеси при отражении падающей волны (слева, $M = 3.0$) или при фокусировке поперечных скачков (справа, $M = 2.7$), двумерный плоский случай. Изолинии давления, молярная масса газа, цветом показана температура (только $T > 1100\text{K}$). Нижняя граница рисунков – плоскость симметрии. is – падающая ударная волна (движется слева направо), rs – отраженная волна, ts – волна внутри пузыря, dw – детонационная волна bis – выпуклый участок падающей волны, be – исходная граница пузыря (пунктир), ib и sb – исходная и ударно-сжатая части пузыря.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕОДНОРОДНЫХ НЕВЯЗКИХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

О.Г. Сутырин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: sutyurin@imec.msu.ru

Описаны два подхода к моделированию течений горючих газовых смесей на основе уравнений Эйлера и конечно-объемного метода «MUSCLE» типа С.К. Годунова второго порядка аппроксимации, включающий HLLC-решатель локальных задач о распаде разрыва.

В первом подходе применяется модель равновесной смеси совершенных газов. Воздух моделируется смесью кислорода и азота в соотношении 1 к 4, а неоднородность заполнена пропанокислородной смесью с добавлением азота и ксенона. Горение пропана моделируется одностадийной кинетикой Вестбрука.

Во втором подходе применяется модель совершенного газа с неоднородным распределением молярной массы. Реакция горения газовой смеси моделируется с помощью двухстадийной кинетики Коробейникова-Левина.

Описаны особенности реализации численного метода и кинетик горения, а также определена зависимость одномерной и двумерной структуры газовой детонации от параметров, входящих в модели горения.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ (МК-3012.2019.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (18-01-00793).

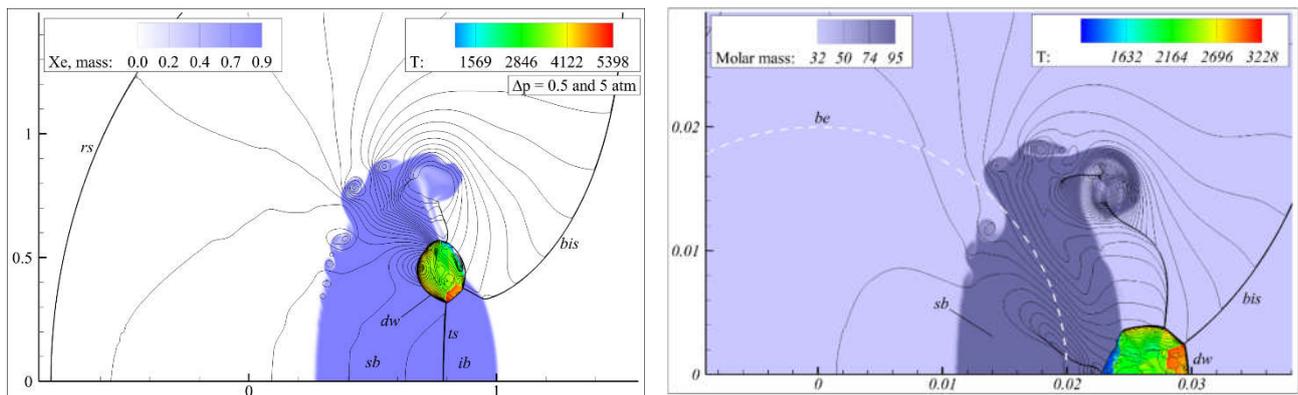


Рис. 1. Примеры расчетов на основе многокомпонентной смеси с одностадийной кинетикой горения (слева) и однокомпонентного газа с неоднородной молярной массой и двухстадийной кинетикой (справа). Изолинии давления, доля примеси тяжелого газа (слева) молярная масса газа (справа), цветом показана температура (только $T > 1100\text{K}$). Нижняя граница рисунков – плоскость симметрии. *is* – падающая ударная волна (движется слева направо), *rs* – отраженная волна, *ts* – волна внутри пузыря, *dw* – детонационная волна *bis* – выпуклый участок падающей волны, *be* – исходная граница пузыря (пунктир), *ib* и *sb* – исходная и ударно-сжатая части пузыря.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ ТУРБИНЫ САМОЛЕТА С ТРАНСПОРТНЫМ УПАКОВОЧНЫМ КОМПЛЕКТОМ

О.Ю. Виленский, Д.А. Лапшин, А.М. Татарский
АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород
e-mail: [silae@okbm.nnov.ru](mailto:silaev@okbm.nnov.ru)

Для транспортировки и хранения радиоактивных материалов применяют специально разработанные для этого контейнеры, которые входят в состав транспортных упаковочных комплектов (ТУК).

В АО «ОКБМ Африкантов» разрабатывается ТУК, предназначенный для транспортировки и хранения отработанного ядерного топлива. В основу разработки ТУК легло выполнение требований нормативной документации (НП-061-05, НП-018-05, НП-001-15) и анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при динамических воздействиях высокой интенсивности [1].

Оценка безопасности при падении самолета является важным проблемным вопросом при проектировании ТУК. Наиболее тяжелые последствия для конструкции могут быть вызваны прямым ударным воздействием двигателя (турбины) самолета. В данной работе рассматриваются вопросы моделирования высокоскоростного соударения турбины самолета с ТУК.

Корпус и несущие элементы ТУК смоделированы в полном соответствии с разработанной геометрией. При проектировании упрощенной конструкции, моделирующей турбину самолета, использовался график динамической нагрузки, полученный при ударном воздействии двигателя самолета Boeing 747 на жесткую стенку, из литературы [2].

В случае высокоскоростного динамического нагружения, сопровождающегося значительным пластическим деформированием, необходимо иметь истинные диаграммы деформирования, получаемые на основе расчетно-экспериментальных исследований путем определения параметров математической модели деформирования материалов. В данной работе использовались свойства конструкционных материалов, полученные из результатов экспериментальных исследований в условиях сжатия и растяжения при различных скоростях деформации и температурах.

Анализ соударения турбины самолета с ТУК был выполнен с использованием аттестованного программного комплекса ANSYS/LS-DYNA, основанного на методе конечных элементов и предназначенного для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов. Результаты проведенного анализа легли в основу формирования конечного облика разрабатываемой конструкции.

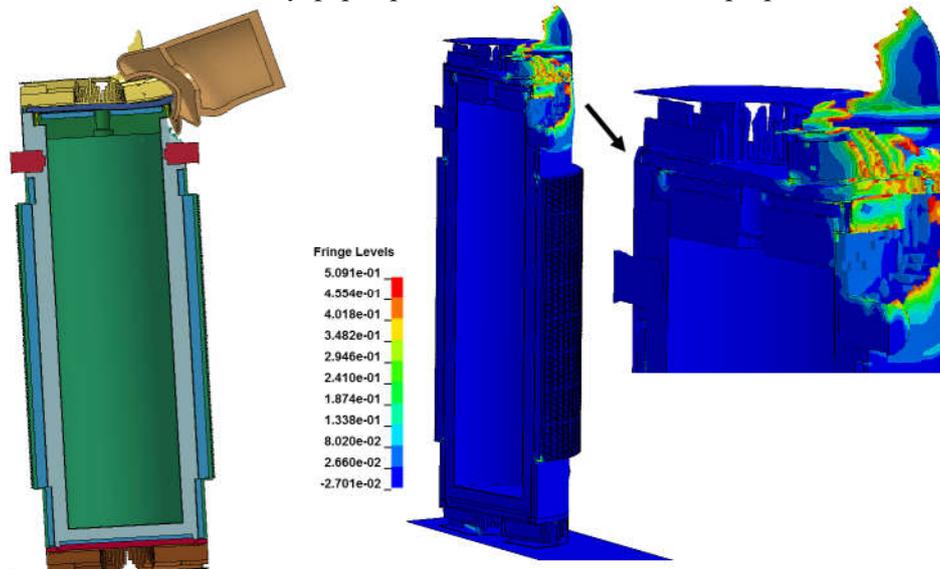


Рис. Пластическая деформация при соударении турбины самолета с ТУК.

1. Виленский О.Ю., Душев С.А., Лапшин Д.А., Татарский А.М. Применение математического анализа при проектировании демпфирующих устройств для ТУК // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным средствам (ВМСППС'2019). 2019 г. С. 245-247.

2. K Shirai et al. Safety analysis of dual purpose metal cask subject to impulsive load due to aircraft engine crash // Journal of Power and Energy Systems, 3. 2009 г. P. 72-82.

К МОДЕЛЯМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР ЛИТОСФЕРЫ

И.С. Телятников

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону
e-mail: ilux_t@list.ru

Механизмы сейсмических процессов до настоящего времени не получили исчерпывающего объяснения. Однако известно, что взаимодействие литосферных структур может привести к резонансным явлениям, способным спровоцировать землетрясения. Развитие механико-математических методов изучения взаимодействия блоковых отдельностей литосферы и диагностики характера дефекта в области их контакта, результаты применения которых в сочетании с интерпретацией результатов экспериментальных геофизических исследований [1] могут быть использованы для разработки и обоснования практических методик исследования процессов, определяющих характер сейсмичности территории, является весьма актуальным.

С помощью метода блочного элемента [2] исследуются задачи, описывающие процессы деформирования при статическом [3] и вибрационном воздействии некоторых классов разноразмерных блочных структур, используемых при моделировании областей взаимодействия плит и микроплит. На примере структуры, включающей покрытие из двух разнотипных контактирующих полуплоскости на трехмерной деформируемой подложке, исследован случай наличия вертикального разлома, способного вызвать локализацию напряженно-деформированного состояния в этой зоне. В качестве покрытий рассматриваются пластины Кирхгофа, движение которых описывается дифференциальными уравнениями в перемещениях [4]. В отличие от сложного алгоритма топологического метода блочного элемента при моделировании взаимодействия структур литосферы по прямолинейному участку границы может быть использован подход, позволяющий обеспечить более быстрое проведение расчетов.

Принятая модель для литосферных структур корового уровня в виде двумерных фрагментов покрытия на трехмерной подложке позволяет изучать особенности распространения сигнала в блочной среде, а также исследовать вопрос потери устойчивости покрытия. Имеющиеся данные о техногенной сейсмичности свидетельствуют о нарастании реакции верхних слоев литосферы на антропогенные воздействия, что делает их практически важным объектом изучения.

Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках ГЗ ЮНЦ РАН, проект № 01201354241 и при частичной поддержке РФФИ (проект 18-01-00124).

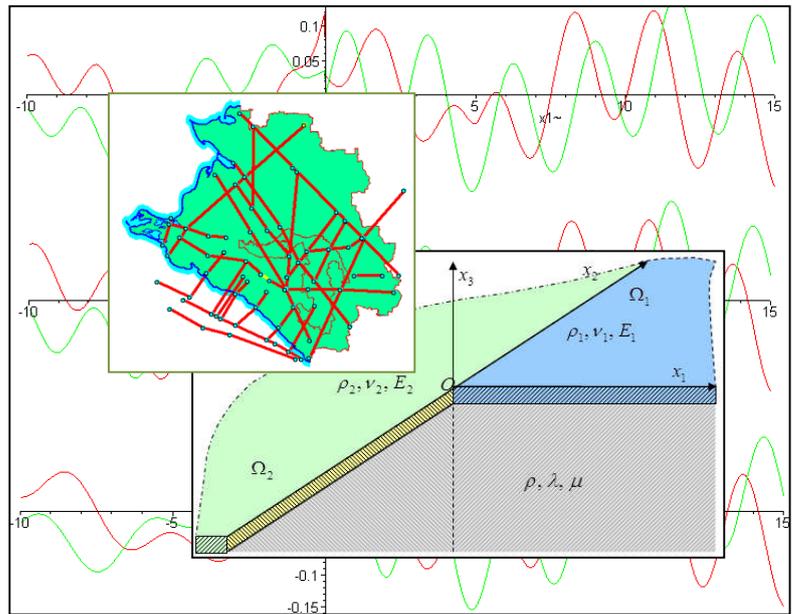


Рис. Модельная блочная структура зоны локального разлома.

1. Мухин А.С., Павлова А.В., Телятников И.С. К методам исследования блочных литосферных структур // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. № 1. С. 65–73.

2. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В. К теории блочного элемента // Доклады АН. 2009. Т. 427. №2. С. 183–187.

3. Telyatnikov I.S. Modeling of Deformation Processes in Lithospheric Structures during their Static Interaction // Thermal Science. 2019. Т. 23. № S2. pp. S591–S597.

4. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. 422 с

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В.В. Терауд

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: ldrnww@gmail.com

Из проведенного обзора литературы следует, что среди открытых российских изданий практически не представлены работы, изучающие шейку и/или отражающие критериальный подход для определения момента локализации деформаций. Имеется лишь небольшое количество несистематизированных работ. В зарубежных публикациях имеется достаточно много работ, посвященных изучению образования шейки в материале и поиску критериев для описания момента локализации деформаций. Среди этих работ явным недостатком является отсутствие систематических экспериментальных исследований, в которых измеряется образование и развитие локализации. Этот недостаток покрывает проведенные экспериментальные исследования и новые критерии, предложенные в данной работе.

В испытаниях использовались образцы двухфазного титанового сплава ($\alpha + \beta$) Ti-6Al-4V (марка ВТ-6). Было проведено 22 эксперимента с длительностью испытания от нескольких часов до двух месяцев – эксп. №19 продлился 59.5 дней. Температура испытаний составляла 600 °С, 500 °С, 450 °С (основная). Начальная рабочая длина образцов – 25 мм, ширина – 5 мм, толщина 1 мм. Постоянная растягивающая сила в начальный момент времени варьировалась от 75 кг до 275 кг в различных испытаниях. Шесть образцов перед экспериментами наводороживались до массовой доли водорода 0.1 %, 0.3 % и 0.6 %. При каждом значении начального растягивающего напряжения эксперимент повторялся несколько раз.

В результате проведенных экспериментов были получены данные о высокотемпературном деформировании титанового сплава с дополнительным влиянием внедренного водорода в структуру металла и без этого влияния (основная часть экспериментов). На рисунке показаны кривые длительной прочности для проведенных экспериментов. В каждом эксперименте получены значения удлинения образца, профиль поперечного сечения от продольной координаты, значения максимального сужения, действующее напряжение и др. в каждый момент времени, а так же значения моментов образования локализации деформаций. Водород существенно снижает время до разрушения, причем тем больше, чем выше уровень концентрации водорода в образце. Для образцов с внедренным водородом локализация деформаций происходит раньше. В данных экспериментах пластичность образцов под действием водорода, оцененная по скорости равномерной ползучести, которая увеличивается в 5 раз ($C_H=0.1\%$) и более чем в 10 раз ($C_H = 0.28\%$). Для исходного материала время локализации составляет в среднем 83 % от времени до разрушения, при содержании водорода 0.1 % оно составляет 48 %, а при содержании 0.28 % уменьшается до 36 % от времени до разрушения.

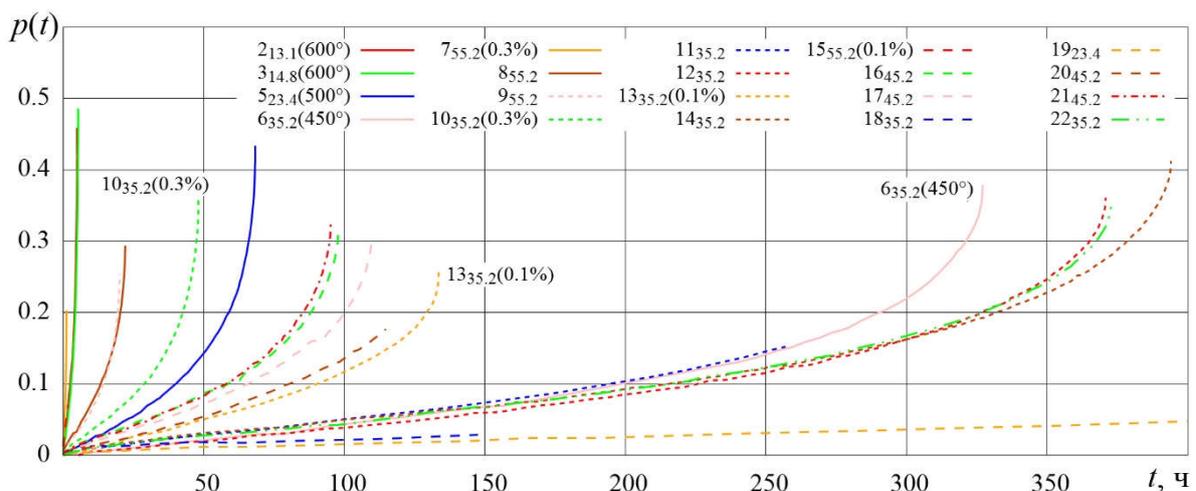


Рис. Кривые длительной прочности. Эксперимент № 19 показан частично. В обозначении первая цифра – номер эксперимента, нижний индекс – начальное напряжение σ_0 [кг/мм²], в скобках дана температура испытания, если отличается от 450 °С, или процент внедренного водорода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №16-38-60200).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В КАНАЛЕ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

В.В. Трифонов, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: trifonovvl@mail.ru

В работе исследовалось явление ламинарно-турбулентного перехода в диффузоре в зависимости от угла раскрытия и степени расширения канала (отношения входного диаметра диффузора к выходному). При расчете использовалась трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности [1]. Расчеты проводились, при числах Рейнольдса на входе в канал от 100 до 4000. На вход в диффузор подавалось, либо развитое турбулентное течение, либо течение с равномерным профилем скорости и с разной энергией турбулентности. Угол раскрытия варьировался от 0.01° до 4° , при этом течение в канале происходило, при положительном, отрицательном или нулевом продольном градиенте давления. Полученные при расчете характеристики течения на выходе диффузора и различных сечениях вдоль диффузора сравнивались с экспериментальными данными [2]. При заданном угле раскрытия и степени расширения, течение в диффузоре зависит только от локального числа Рейнольдса и не зависит от условий на входе, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения. Было показано, что при увеличении длины диффузора турбулентное течение затухает и плавно переходит в ламинарное.

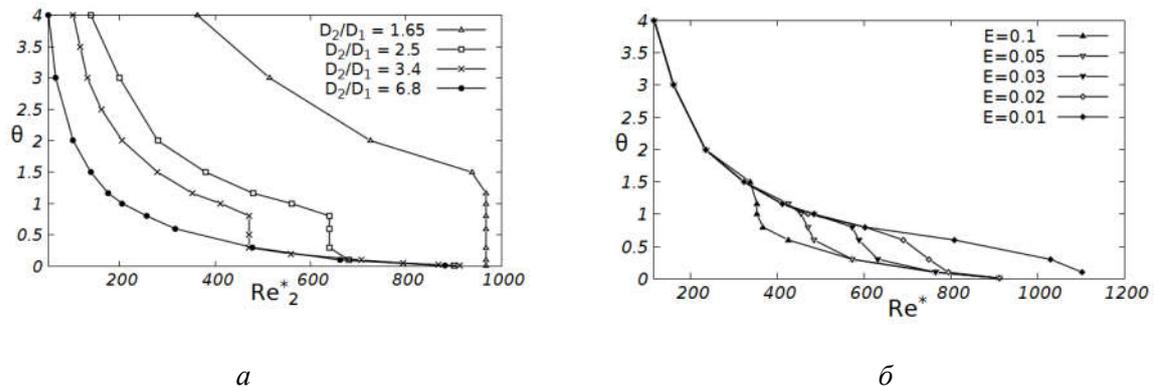


Рис. Зависимость угла раскрытия от критического числа Рейнольдса.

а – при разной степени расширения диффузора; б – при степени расширения канала 3.4 и разной энергии турбулентности на входе в диффузор.

Получены рис. а зависимости критического числа Рейнольдса от угла раскрытия для диффузоров с разной степенью расширения 1.65, 2.5, 3.4 и 6.8 (обозначение индексов: 1 – вход в диффузор, 2 – выход из диффузора). При угле раскрытия 0.01° , что очень близко к прямой круглой трубе, критическое число Рейнольдса для заданных степеней расширения лежит в диапазоне от ~ 900 до ~ 1000 . Также получены зависимости рис. б критического числа Рейнольдса от угла раскрытия со степенью расширения канала 3.4 и разной энергией турбулентности на входе в диффузор.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00074, РФФИ № 19-05-00028.

1. Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1978. № 3. С. 13–25.

2. Reshmin A.I., Trifonov V.V., Teplovodskii S.Kh. Turbulent flow in a conical diffuser with a small divergence angle at Reynolds numbers less than 2000. ASME 2014, FEDSM2014-21597.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА РАСКРЫТИЯ НА ЯВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В ДИФфуЗОРЕ

В.В. Трифонов, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: trifonovvl@mail.ru

В работе исследовалось явление ламинарно-турбулентного перехода в диффузоре в зависимости от угла раскрытия и степени расширения канала (отношения входного диаметра диффузора к выходному). При расчете использовалась трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности [1]. Расчеты проводились, при числах Рейнольдса на входе в канал от 100 до 4000. На вход в диффузор подавалось, либо развитое турбулентное течение, либо течение с равномерным профилем скорости и с разной энергией турбулентности. Угол раскрытия варьировался от 0.01° до 4° , при этом течение в канале происходило, при положительном, отрицательном или нулевом продольном градиенте давления. Полученные при расчете характеристики течения на выходе диффузора и различных сечениях вдоль диффузора сравнивались с экспериментальными данными [2]. При заданном угле раскрытия и степени расширения, течение в диффузоре зависит только от локального числа Рейнольдса и не зависит от условий на входе, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения. Было показано, что при увеличении длины диффузора турбулентное течение затухает и плавно переходит в ламинарное.

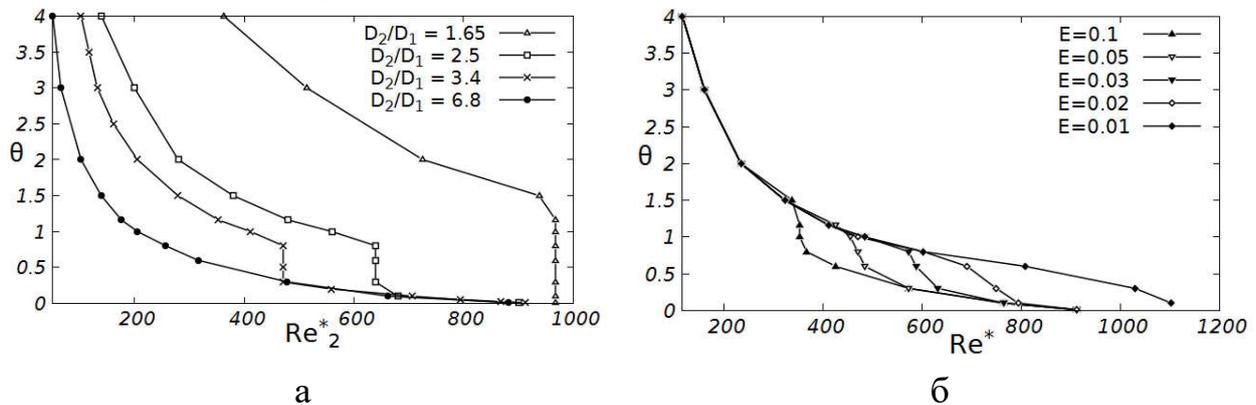


Рис. Зависимость угла раскрытия от критического числа Рейнольдса.

Получены рис. а зависимости критического числа Рейнольдса от угла раскрытия для диффузоров с разной степенью расширения 1.65, 2.5, 3.4 и 6.8 (обозначение индексов: 1 - вход в диффузор, 2 - выход из диффузора). При угле раскрытия 0.01° , что очень близко к прямой круглой трубе, критическое число Рейнольдса для заданных степеней расширения лежит в диапазоне от ~ 900 до ~ 1000 . Также получены зависимости рис. б критического числа Рейнольдса от угла раскрытия со степенью расширения канала 3.4 и разной энергией турбулентности на входе в диффузор.

В докладе будет рассмотрен вопрос как влияет степень расширения канала на величину генерации турбулентного течения. Также будут представлены изменения энергии турбулентности по сечению диффузора за счет переноса, генерации, диссипации и диффузии турбулентного течения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00074, РФФИ № 19-05-00028

1. Луцик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1978. № 3. С. 13 - 25.

2. Reshmin A.I., Trifonov V.V., Teplovodskii S.Kh. Turbulent flow in a conical diffuser with a small divergence angle at Reynolds numbers less than 2000. ASME 2014, FEDSM2014-21597.

ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ

П.М. Тюбаева^{1,2}, А.А. Ольхов^{1,2}, В.В. Подмастерьев², Э.А. Мамин^{1,2}, А.А. Попов^{1,2}

¹ Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва

² Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

e-mail: polina-tyubaeva@yandex.ru

В настоящее время большой научный и практический интерес представляет разработка и исследование нетканых волокнистых материалов медицинского назначения на основе биополимеров. Одним из наиболее перспективных методов получения материалов с высоко развитой поверхностью является электроформование [1]. Актуальным научным направлением является исследование влияния газообразного озона на материалы и изделия медицинского назначения, в виду того, что метод озонирования является одним из эффективных способов стерилизации [2]. Целью данной работы было рассмотрение особенностей структуры ультратонких волокон на основе поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ), которые формируют слой нетканого материала, и установление закономерностей влияния озона на физико-механические и теплофизические свойства полученных материалов [3].

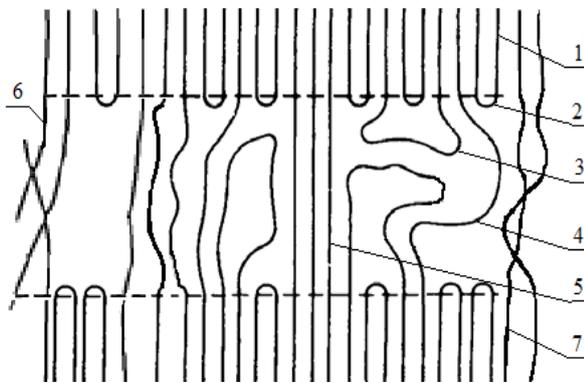


Рис. Организация макромолекул ПГБ, ориентированных в фибрилле, где: 1 – кристаллические области; 2 – регулярная складка цепи; 3 – нерегулярная складка цепи (свободная петля); 4 – проходные молекулы; 5 – наиболее короткие, вытянутые и напряженные проходные молекулы; 6 – межфибриллярные проходные цепи; 7 – межфибриллярные структуры.

В результате серии экспериментов было установлено, что под влиянием озона разрывная нагрузка нетканых волокнистых материалов на основе ПГБ может быть увеличена не менее, чем в 2 раза. Более того, заметно увеличиваются модуль упругости, относительная деформация и максимальное удлинение материала до момента разрыва. В работе высказаны предположения о причинах изменений прочностных свойств материалов, а также рассмотрен механизм протекания химической реакции между газообразным озоном и макромолекулами ПГБ, образующими структуру материала (Рис. 1). На начальной стадии озонирования происходит разрыв макромолекул, появляется возможность для их более регулярной укладки в аморфной фазе, что подтверждается ростом энтальпии плавления озонированных образцов.

Полученные данные подтверждают эффективность применения метода озонирования для стерилизации нетканых материалов на основе ПГБ для медицинских изделий.

1. Филатов Ю. Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). М.: Нефть и Газ, 1997.

2. Shtilman M. I. Technology for obtaining polymers for medical and biological purposes M: Академкнига, 2006.

3. Tyubaeva P. M., Olkhov A. A., Podmasteriev V. V. Physical and mechanical properties of nonwoven materials for medical purposes based on polyhydroxybutyrate. // Journal of Physics: Conference Series, 2018, V. 1129, №1, номер статьи 012034.

ВЛИЯНИЕ ИНГИБИТОРОВ PGH-СИНТЕТАЗЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СИГНАЛА BOLD И МЕТАБОЛИЗМ ГЛУТАМАТА В ЗРИТЕЛЬНОЙ КОРЕ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ ВИДЕОСТИМУЛЯЦИИ ПО ДАННЫМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МРТ

М.В. Ублинский^{1,2}, А.В. Манжурцев^{1,2}, А.Н. Яковлев^{1,2}, Н.А. Семенова^{1,2,3}, Т.А. Ахадов¹

¹НИИ Неотложной детской хирургии и травматологии, Москва

²Институт Биохимической Физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

³Институт химической физики им. Н. Н. Семенова, Москва

e-mail: maxublinsk@mail.ru

Введение: Важнейшим и до сих пор не решённым вопросом является связь между нейронной активностью и вазодилатацией. Целью данной работы является изучению механизмов действия противовоспалительных нестероидных препаратов регуляцию гемодинамического ответа головного мозга человека (BOLD эффект), вызванного зрительной стимуляцией.

Материалы и методы: Исследовательская группа состояла из 10 здоровых участников в возрасте от 18 до 28 лет (средний возраст - 23,5 года). Все исследования МРТ проводились на сканере Philips Achieva dStream 3.0T (рис.), при помощи 32-канальной головной катушкой Philips dStream. Для



проведения фМРТ исследования использовалась эхо-планарная импульсная последовательность (EPI) (TR = 3000 мс, время эха [TE] = 30 мс, 100 динамик, длительность каждой динамики = 3 с). В качестве визуальных стимулов для фМРТ использовалась мигающая шахматная доска с частотой 8 Гц. Все исследования МРТ для каждого участника были повторены дважды: после первого сканирования МРТ все участники приняли таблетку ацетилсалициловой кислоты для ингибирования синтеза простагландинов - одного из основных способов вазодилатации. Межгрупповой анализ (до / после приема таблеток) оценивался с использованием критерия

Уилкоксона.

Результаты: С помощью межгруппового анализа, проведённого в программе SPM, определены структуры головного мозга (передние отделы таламуса), где отмечается статистически значимое влияние ингибиторов вазодилатации в виде снижения интенсивности BOLD-ответа на нейростимуляцию.

Заключение: Как известно, таламус передаёт информацию между различными подкорковыми областями и корой головного мозга. Вот почему обнаруженные нами изменения могут указывать на нарушения в передаче зрительной информации в мозг человека при ингибировании одного из основных способов вазодилатации.

Полученный результат будет иметь не только фундаментальное, но и практическое значение, поскольку BOLD косвенно характеризует нейронную активность. Поэтому наблюдаемые изменения очень важны для понимания регуляции биологических функций в норме и при патологических состояниях.

Работа поддержана грантом РФФ 18-130-0030.

1. Semenova N., Menshchikov P., Manzhurtsev A., Ublinskiy M., Akhadov T., Varfolomeev, S. Dynamics of in Vivo Metabolites Concentrations in Posttraumatic Period of Human Brain. 1H MRS Study // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2019. 484. 25-28.

2. Harris J. J., Reynell C., Attwell D. The physiology of developmental changes in BOLD functional imaging signals //Developmental cognitive neuroscience. 2011. Т. 1. №. 3. С. 199-216.

3. Варфоломеев С.Д., Мевх А.Т. Простагландины - молекулярные биорегуляторы: биокинетика, биохимия, медицина. - М.: МГУ, 1985. - 307 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА

И.С. Уткин, О.Э. Мельник

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: utkin@imec.msu.ru

Перемещение магмы в земной коре в основном происходит в результате образования трещин, называемых дайками, через которые магма поднимается к поверхности Земли [1]. Большая часть даек не достигает поверхности, а останавливается на уровне нейтральной плавучести или блокируется твердыми слоями пород. При локализованном внедрении большого количества даек возникают магматические очаги, то есть области с высокой долей расплавленных пород.

Рост трещины и заполнение ее расплавом сопровождаются деформацией вмещающих пород. В существующих моделях формирования магматических очагов наличие этих деформаций либо не учитывается, либо перемещение пород определяется из упрощенных кинематических соотношений при заданном расположении и размере дайки [2,3].

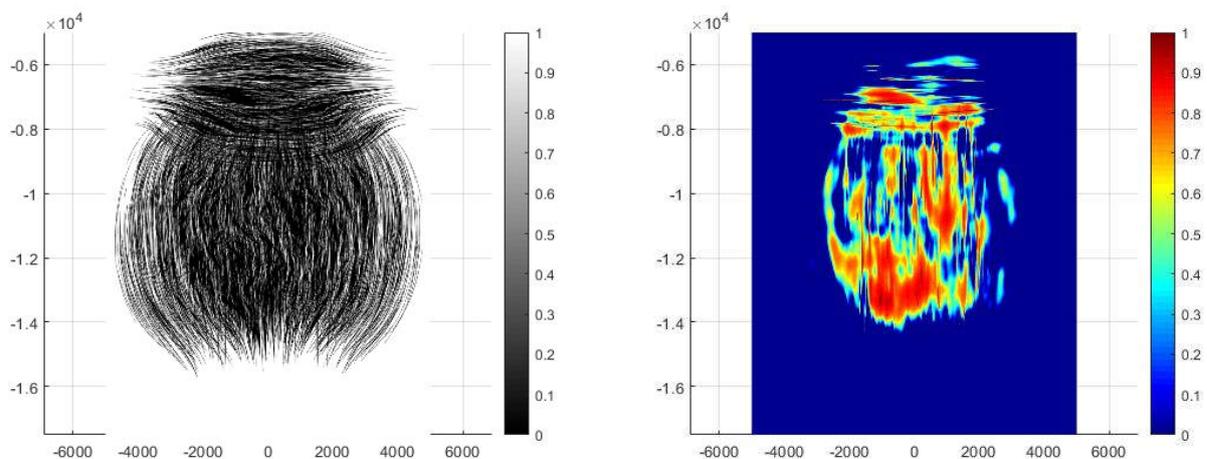


Рис. Объемная доля магмы (а) и доля расплава (б) через 4000 лет после начала внедрения даек.

В настоящей работе предлагается новая модель тепломассопереноса в процессе периодического внедрения магмы во вмещающие породы. В модели учитывается возможность произвольного расположения и ориентации даек в пространстве, а также наличие упругих деформаций вмещающих пород при внедрении даек. Перемещение пород при наличии движущейся магмы описывается аналитическим решением задачи нагружения внутренним давлением трещины, находящейся в бесконечной плоскости. Показано, что при типичных для островодужных вулканов значениях потока магмы формирование очагов возможно в течение сотен лет от начала притока магмы. Проанализировано влияние расхода магмы, размера даек и их ориентации на объем и форму очага.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-01-00352).

1. Rubin A.M. Propagation of magma-filled cracks // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Год 1995. Т. 23. № 1. С. 287-336.

2. Annen C. From plutons to magma chambers: Thermal constraints on the accumulation of eruptible silicic magma in the upper crust // Earth and Planetary Science Letters. Год 2009. Т. 284. № 3-4. С. 409-416.

3. Dufek J., Bergantz G. W. Lower crustal magma genesis and preservation: a stochastic framework for the evaluation of basalt–crust interaction // Journal of Petrology. Год 2005. Т. 46, № 11. С. 2167-2195.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ, ВЫЗВАННЫХ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

И.С. Уткин, А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: utkin@imec.msu.ru

На активных вулканах часто наблюдаются перемещения поверхности Земли, величина которых может достигать нескольких метров. Периоды подъема и опускания поверхности хорошо коррелируют с периодами повышенной и пониженной вулканической активности [1]. В таких вулканических системах магматический очаг залегает на глубине нескольких километров под поверхностью Земли. При остывании из очага отделяются летучие компоненты, в основном водяной пар и углекислый газ, которые по проницаемым вмещающим породам поднимаются к поверхности. При этом давление и температура жидкости являются источниками напряжений, деформирующих вмещающие породы.

Традиционный полуаналитический подход к моделированию деформаций пород, рассматриваемый в литературе, заключается в том, что каждая ячейка расчетной сетки считается независимым источником деформаций. Для этой ячейки из аналитического решения о нагружении полубесконечной плоскости точечным источником рассчитывается поле перемещений, а полный вектор перемещений в какой-либо точке пространства получается путем суммирования вкладов всех ячеек. Такой подход работает только в предположении плоской поверхности Земли и однородного распределения механических свойств среды по пространству.

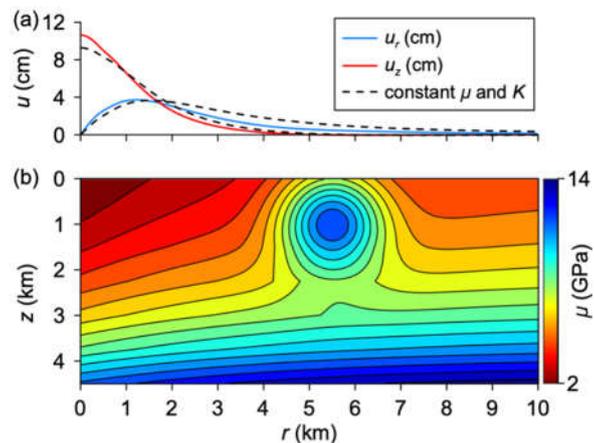


Рис. Вертикальная и горизонтальная компоненты вектора перемещений в зависимости от радиуса (а) и распределение модуля сдвига в расчетной области (б).

Целью настоящей работы является создание метода, позволяющего рассчитывать деформации пород с учетом механических неоднородностей. Для тестирования этого метода проводится численное моделирование напряженно-деформированного состояния пород в процессе дегазации магматического очага в гидротермальной системе *Campi Flegrei*. Жидкая и газовая фазы моделируются двухкомпонентной смесью вода-углекислый газ, а твердая фаза, т.е. проницаемые породы, моделируется линейной термoporoupryгой средой. Расчет фильтрации жидкости и газа производится в симуляторе MUFITS, а расчет напряжений и перемещений пород производится методом конечных разностей в отдельной программе. Обратное влияние деформации пород на механику жидкости не учитывается.

Проведено сравнение нового метода с полуаналитическим подходом, исследовано влияние граничных условий на результаты расчетов. Проведены расчеты деформаций пород для случая неоднородного распределения модуля сдвига и коэффициента Пуассона по пространству. Показано, что в диапазоне значений механических свойств пород, характерных для системы *Campi Flegrei*, учет наличия неоднородности несущественно влияет на значения перемещений поверхности.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №19-71-10051.

1. Rinaldi A. P., Todesco M., Bonafede M. Hydrothermal instability and ground displacement at the Campi Flegrei caldera // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Год 2010. Т. 178. №. 3-4. С. 155-161.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УВОДА КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Л.Ф. Файзуллин, Р.С. Пикалов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара
e-mail: lenarfay@gmail.com

Проблема засорения околоземного космического пространства – одна из важнейших проблем, стоящих перед человечеством сегодня. В 1987 году американский астрофизик Дональд Кесслер рассмотрел возможные последствия неконтролируемого увеличения количества искусственных объектов на орбите. Рассмотренный им процесс, названный эффектом Кесслера, показал возможность лавинообразного роста космического мусора, который может быть инициирован столкновением всего двух крупных объектов [1]. Количество объектов космического мусора на орбите нашей планеты по данным на 2010 год составляет около 16 тыс. [2] и это число с каждым годом растет, а значит растет и вероятность сценария, предложенного Кесслером.

В работе рассматривается процесс увода крупногабаритного космического мусора посредством буксировки на гибкой сцепке и влияние на этот процесс выбора точки закрепления троса. Буксир моделируется как материальная точка, космический мусор – как твердое тело, трос рассматривается как упругий, невесомый стержень, ориентация тела определяется углом φ между осями систем координат [3].

Рассмотрено движение в бессиловом и центральном ньютоновском гравитационном полях в случаях плоского и пространственного движения. Проведена серия численных экспериментов.

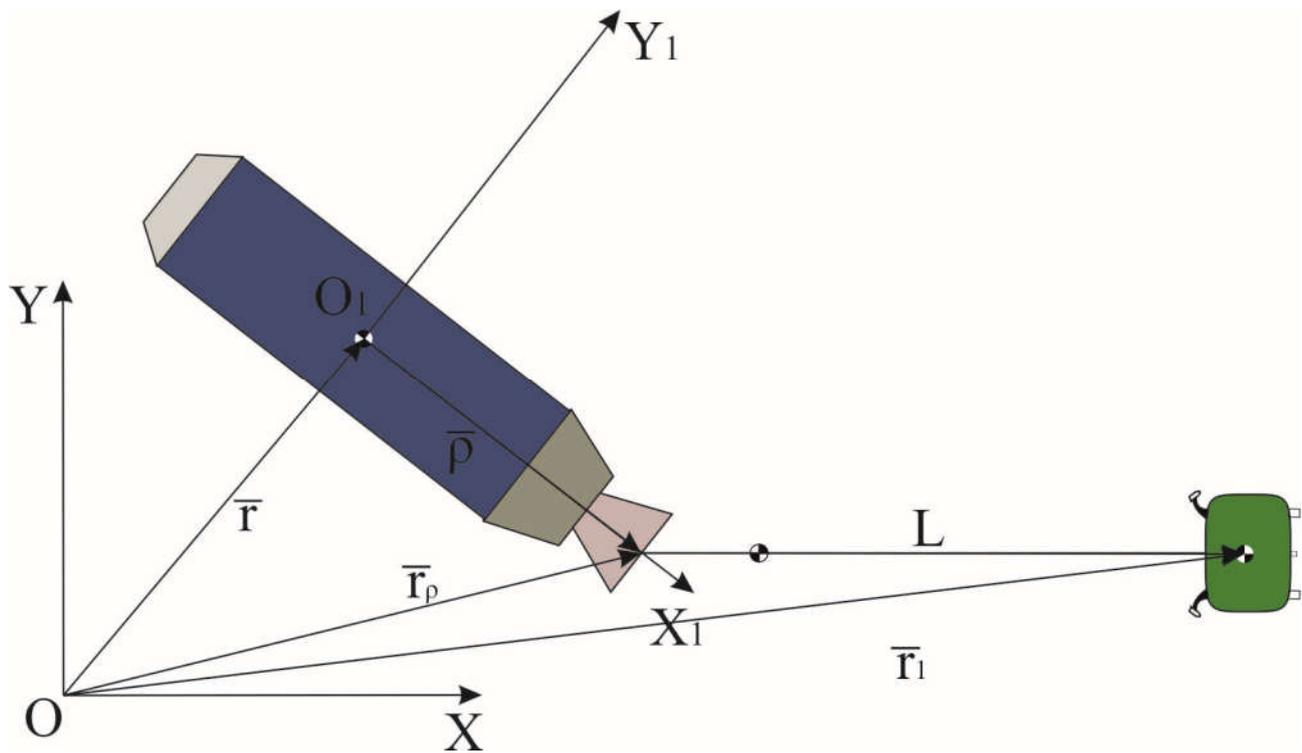


Рис. Схема системы.

1. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt // Journal of geophysical research, 1978, vol. 83, pp. 2637 - 2646.

2. Wood A. Gravity by Alfonso Cuarón // Science Fiction Film and Television, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 441 - 444.

3. Файзуллин Л. Ф. Управление связкой буксир-космический мусор на этапе буксировки [Текст] / Л. Ф. Файзуллин // Королевские чтения. 2019. Т. 1. С. 71 - 72

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Ю.Б. Фасхутдинова, О.Ю. Сметанников

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: fub26@mail.ru

Эффект памяти формы в изделиях из сшитого полиэтилена лежит в основе изготовления и применения термоусаживаемых трубок (рис. 1). На этапе экспандинга предварительно нагретое изделие расширяют, а затем охлаждают, тем самым «замораживая» полученные деформации. Затем на этапе термоусадки при непосредственном использовании изделий в качестве изолирующих материалов, трубки надевают на соединение проводов или труб и нагревают, тем самым «размораживая» деформации. Трубка при этом стремится вернуться к своим первоначальным размерам и форме.

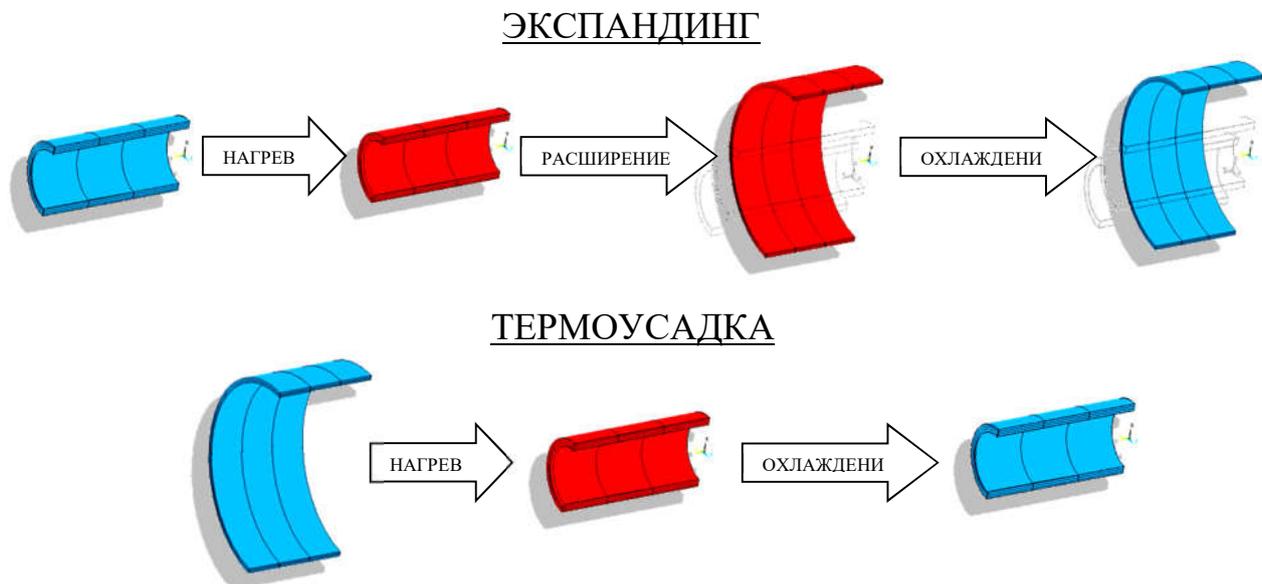


Рис.1. Схематичное изображение очередности процессов на этапах экспандинга и термоусадки термоусаживаемой трубки.

Как на этапе экспандинга, так и на этапе термоусадки, появляется осевая усадка, являющаяся нежелательным явлением. Для поиска причины осевой усадки было проведено упрощенное численное моделирование термомеханического поведения термоусаживаемой трубки средствами программного пакета ANSYS, а также моделирование реального технологического этапа экспандинга. Для каждой задачи была проведена серия численных экспериментов, различающихся типом ограничений в осевом направлении. Сделан вывод о том, что причиной осевой усадки является слишком большая осевая сила.

Для устранения осевой усадки предложено обеспечить равенство скоростей подачи и извлечения трубчатой заготовки из экспандера. Выполнены проверочные расчеты, демонстрирующие некорректность предложенного решения, вследствие различий граничных условий в процессе деформирования при экспандинге и термоусадке. Показано, что осевую усадку можно устранить на этапе термоусадки путем создания дополнительных продольных сжимающих усилий в процессе расширения на этапе экспандинга.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ВОДА – АМОРФНЫЙ КВАРЦ, ПОКРЫТЫЙ ПАВ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Т.П. Любимова^{1,2}, К.А. Рыбкин², О.О. Фатталов²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

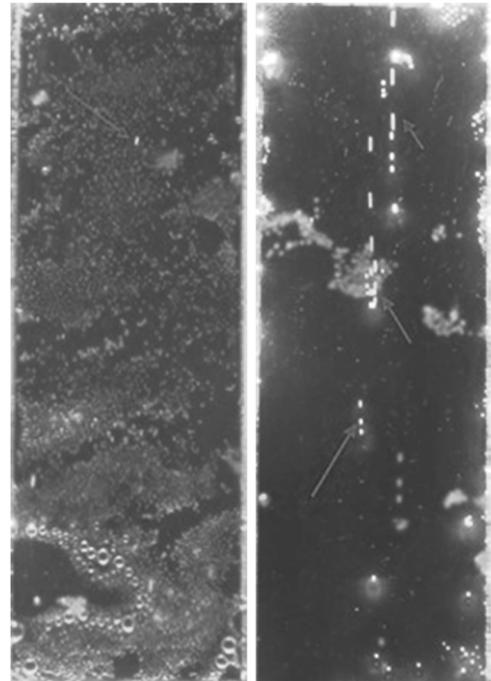
²Физический факультет ПГНИУ, Пермь

e-mail: fattalov@mail.ru

Динамика кавитационных пузырьков, возникающих в жидкости, зависит от различных факторов: может наблюдаться как разрушение пузырьков, так и их слияние, а также длительное существование относительно крупных пузырьков как в объеме жидкости, так и вблизи твердых поверхностей [1,2]. Коллапс пузырьков создает локальные экстремальные давления и температуры, а также ударные волны в жидкости, которые оказывают существенное влияние на поверхность, а также на динамику и коалесценцию пузырьков, находящихся в области кавитационной активности.

В данной работе экспериментально исследована динамика парогазовых пузырьков вблизи и на поверхности твердых плоских пластин из аморфного кварца, покрытых поверхностно-активным веществом (ПАВ), погруженных в дистиллированную воду под действием ультразвука (УЗ). Обнаружено значительное влияние наличия ПАВ на поверхности кварца на динамику пузырьков на границе раздела фаз. В случае гидрофильной поверхности кварца в дистиллированной воде под действием ультразвука образуются инерционные осциллирующие пузырьки, которые, достигая критического диаметра за счет процессов коалесценции, всплывают вверх. При наличии ПАВ на поверхности парогазовые пузырьки образуют линейные цепочки (скопления) пузырьков, которые растут со временем под действием ультразвука и остаются прикрепленными к твердой поверхности в течение всего времени ультразвуковой обработки. Даже после отключения УЗ большинство пузырьков остаются вмороженными в поверхность.

На рисунке справа приведены типичные фотографии, полученные в ходе экспериментов: слева - пластина, покрытая ПАВ, справа – чистая пластина аморфного кварца. На фотоснимках запечатлён момент отключения УЗ, красными стрелки указывают на всплывающие пузырьки.



Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-31-90138) и Программы поддержки Научных школ Пермского края (грант № С-26/788).

1. Lyubimova T. P. et al., Dynamics of Vapor-Gas Bubbles in a Liquid Near Solid Surfaces with Different Properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, T. 581, №. 1. p. 012041.

2. Rybkin, K. A., Bratukhin, Y. K., Lyubimova, T. P., Fattalov, O.O., Filippov, L.O., Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions// In Journal of Physics: Conference Series, 2017, Vol. 879, No. 1, p. 012026.

ОТДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ПРИ ДВИЖЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Т.В. Хоружий¹, М.С. Алексеев¹, Д.А. Артюхов¹, Е.В. Горбачева²

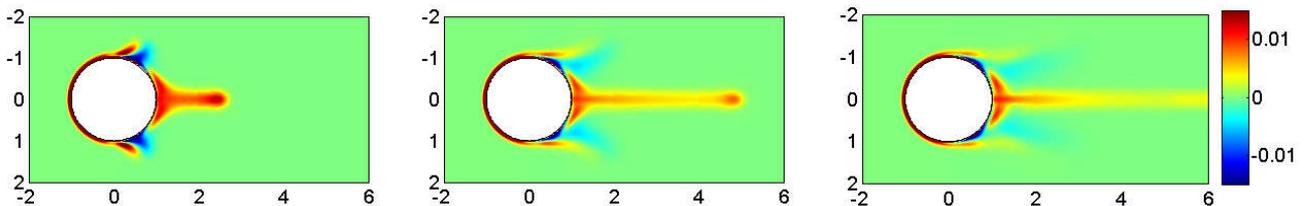
¹МБОУ Лицей № 4, Краснодар

²Кубанский государственный университет, Краснодар

e-mail: katya1911@list.ru

Работа посвящена численному моделированию движения сферической диэлектрической частицы, непроницаемой для ионов в проводящей жидкости под действием сильного электрического поля. Математически, система описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, с которую входят следующие уравнения: уравнения Пуассона для электрического потенциала, уравнение Нернста-Планка для переноса ионов (учитывает диффузию, конвекцию и электромиграцию) и уравнение Стокса для ползущего течения. Кроме того, в систему входит малый параметр – число Дебая, которая стоит перед членом со второй производной, что значительно осложняет численное решение системы.

Эта задача имеет много общего с аналогичной задачей электрофореза ионоселективной частицы [1,2]. Однако численное моделирование электрофореза диэлектрической частицы в сильном электрическом поле показало наличие необычного эффекта (который не был обнаружен для ионоселективной частицы) – отрыва пространственного заряда позади частицы и сохранение заряженной области на большом расстоянии от поверхности микрочастицы. Стоит отметить, что моделировалось поведение сильнозаряженных частиц, т.е. значение поверхностного заряда было достаточно велико. В одной из последних экспериментальных работ [3] изучалось поведение диэлектрических микро и наночастиц с различными значениями поверхностного заряда.



На рисунке изображено распределение плотности заряда около диэлектрической частицы в разные последовательные моменты времени. Хорошо прослеживается процесс формирования и отрыва пространственного заряда. При этом после отрыва заряда, область остается заряженной.

Кроме того, справа от частицы формируется область с повышенной относительно равновесной концентрацией электролита. Причем при увеличении напряженности электрического поля, концентрация в данной области так же повышается, сама область деформируется и постепенно превращается в вытянутую, похожую на струю структуру. Протяженность струи в наших расчетах может достигать вплоть до десяти радиусов микрочастицы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-48-235001 р_Наставник.

1. E.A. Frants, G.S. Ganchenko, V.S. Shelistov, S. Amiroudine, and E.A. Demekhin. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields. *Physics of Fluids* 30, 022001 (2018).

2. G.S. Ganchenko, E.A. Frants, V.S. Shelistov, N.V. Nikitin, S. Amiroudine, E.A. Demekhin. Extreme nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule. *Physical Review Fluids* 4, 043703 (2019).

3. S. Tottori, K. Misiunas, U. Keyser, D. Bonthuis, Nonlinear Electrophoresis of Highly Charged Nonpolarizable Particles. *Physical Review Letters* 123(1), 014502 (2019).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАРУШЕНИЙ СОКРАТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ И ПРОВОДИМОСТИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА

А.Р. Хабибуллина¹, Ф.А. Сёмин^{2,3}, А.К. Цатурян^{1,2}

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

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

³Российский университет дружбы народов, Москва

e-mail: khabibullina14@mail.ru

В докладе представлены результаты применения многоуровневой модели левого желудочка сердца в системе кровообращения [1, 2] для исследования локальных нарушений сократительных свойств миокарда желудочка и задержки проведения возбуждения сокращения в стенке желудочка. Миокард левого желудочка описывали как несжимаемую трансверсально-изотропную среду с пассивными нелинейно упругими свойствами и активными механическими напряжениями. Изменяя сократительную способность миокарда желудочка, мы провели детальное исследование влияния инфаркта миокарда верхушки желудочка (предварительные результаты были представлены в [3]). Для изучения влияния распределения по стенке желудочка задержки волны активации сокращения на производительность сердца модель была дополнена алгоритмом, задающим подобную задержку. Для каждого численного эксперимента проводили оценку основных характеристик работы сердца: ударного объема, напряжения вдоль волокон, интенсивности напряжений по Мизесу и глобальных деформаций во время сердечного цикла. Результаты расчета влияния апикального инфаркта миокарда левого желудочка на распределение напряжений в его стене показаны на рис. 1.

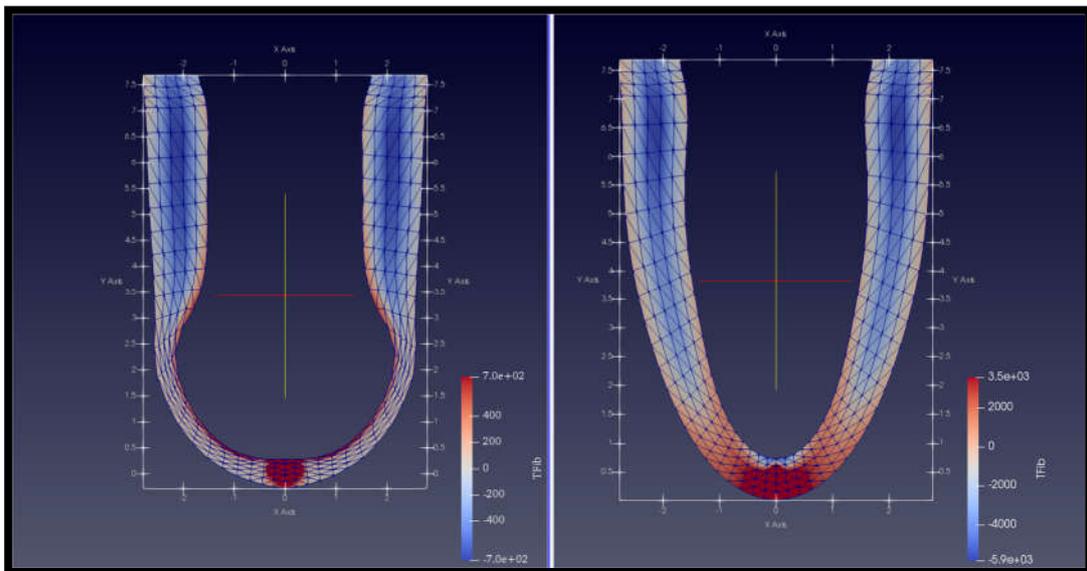


Рис.1. Расчетные напряжения в мм рт. ст. вдоль волокон в конце систолы при инфаркте (слева) и здоровом сердце (справа).

Результаты расчётов показали хорошее соответствие с клиническими данными, показывающими локальные нарушения сокращений миокарда в области верхушки желудочка и снижение ударного объема при верхушечном инфаркте.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-31-00065.

1.Syomin F.A., Zberia M.V., Tsaturyan A.K. Multiscale simulation of the effects of atrioventricular block and valve diseases on heart performance // Int J Numer Methods Biomed Eng. 2019. V. 35(7):e3216.

2.Сёмин Ф.А., Осемян А.Ш., Хабибуллина А.Р., Цатурян А.К. Многомасштабная модель механики левого желудочка сердца в системе кровообращения // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Материалы симпозиумов. 2019. 4: 203-205.

3.Syomin F., Khabibullina A., Osepyan A., Tsaturyan A. The multiscale simulation of apical myocardial infarction and shape variation of the left ventricle of the heart // ITM Web of Confer. 2020. 31: 01006.

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА

В.В. Химуля

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

e-mail: valery.khim@gmail.com

Определение и анализ механических свойств горных пород, особенно реологических характеристик, необходимы как для выбора правильного режима эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, так и в целях определения условий устойчивости стенок скважин. Помимо этого, одним из важнейших вопросов нефтегазовой отрасли остается проблема повышения дебита добывающих скважин. Главное влияние на величину притока углеводородов оказывает состояние призабойной зоны скважины. Ухудшение проницаемости даже в малой окрестности скважины может существенно снизить ее продуктивность [1]. При бурении и эксплуатации скважин происходит существенное изменение напряженно-деформированного состояния горных пород, что оказывает значительное влияние на их фильтрационные и реологические характеристики. Физическое моделирование реального изменения напряжений в скважине позволяет среди прочего не допустить уменьшения дебита и разрушения стенок скважин или же, напротив, многократно увеличить их продуктивность [2]. Особенно актуальным сегодня становится поиск эффективных способов повышения нефтеотдачи для месторождений с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов. Одним из наиболее перспективных подходов является созданный в ИПМех РАН метод направленной разгрузки пласта, который опирается на создание в низкопроницаемых породах-коллекторах искусственной проницаемости за счёт направленной разгрузки пласта от горного давления.

Изучение влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на характер деформирования и процессы ползучести, а также на проницаемость горных пород было проведено на установке истинно трехосного независимого нагружения (ИСТНН) в Институте проблем механики РАН. ИСТНН (рис. 1.) позволяет нагружать кубические образцы горных пород независимо по каждой из трех осей и измерять изменение проницаемости в ходе эксперимента [3].



Рис. 1. Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН)

На установке проведено физическое моделирование процессов деформирования и разрушения пород ачимовских отложений в условиях реально возникающих при проведении различных операций на скважинах напряжений на глубинах около 4-х км. Построены кривые деформирования, исследованы зависимости от времени деформаций пород в условиях сложного трехосного нагружения, установлены деформационные, прочностные и фильтрационные характеристики пород и их зависимости от напряжений.

Сделаны выводы об оптимальном режиме эксплуатации скважин с целью недопущения негативных процессов в пласте. Полученные

данные могут быть использованы для определения технологических операций, необходимых для увеличения проницаемости пород-коллекторов методом направленной разгрузки пласта.

Работа поддержана грантом РФФ № 16-11-10325-П.

1. Джон Кук, Рене А.Фредериксен, Клаус Хасбо и др. О важности механических свойств горных пород: лабораторная проверка геомеханических данных // Нефтегазовое обозрение, 2007 г.

2. Карев В. И., Химуля В. В. Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород-коллекторов нефтегазовых месторождений // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2018. № 4. С. 1840405..

3. Karev V., Kovalenko Yu. Triaxial loading system as a tool for solving problems of oil and gas production // The 12th International Congress on Rock Mechanics. 2011.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКАЧКИ ВОДЫ, УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА, МЕТАНА И ПРОПАНА ДЛЯ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ

А.А. Чернова^{1,2}

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

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

e-mail: anya_chernova_2504@mail.ru

Рассматривается закачка смесей воды, углекислого газа, метана и пропана в геологический пласт, насыщенный нефтью. Исследуется в каком порядке и в течение каких интервалов времени нужно закачивать указанные газы и воду для максимального вытеснения наиболее ценных бензиновых фракций нефти.

Оптимальные режимы закачки газов исследуются в рамках одномерной постановки задачи. Предполагается, что при $t = 0$ пласт $0 < x < L$ насыщен нефтью заданного состава. При $t > 0$ через границу $x = 0$ закачивается вода, углекислый газ, метан и пропан с заданным объемным расходом Q , а нефть, таким образом, вытесняется через границу $x = L$. Определяются составы газов, позволяющие максимизировать для данного момента времени t вытеснение наиболее ценных компонент углеводородного ряда. Для определения оптимального состава вытесняющей смеси сначала рассматривается закачка каждого вещества по отдельности, а затем – их смеси. Показано, что вода – более эффективный вытесняющий агент на начальном этапе закачки, однако ряд газов (как, например, CO_2) оказываются более эффективными на поздних этапах. Проведены оптимизационные расчеты, позволившие определить наиболее эффективные смеси на различных этапах разработки месторождений.

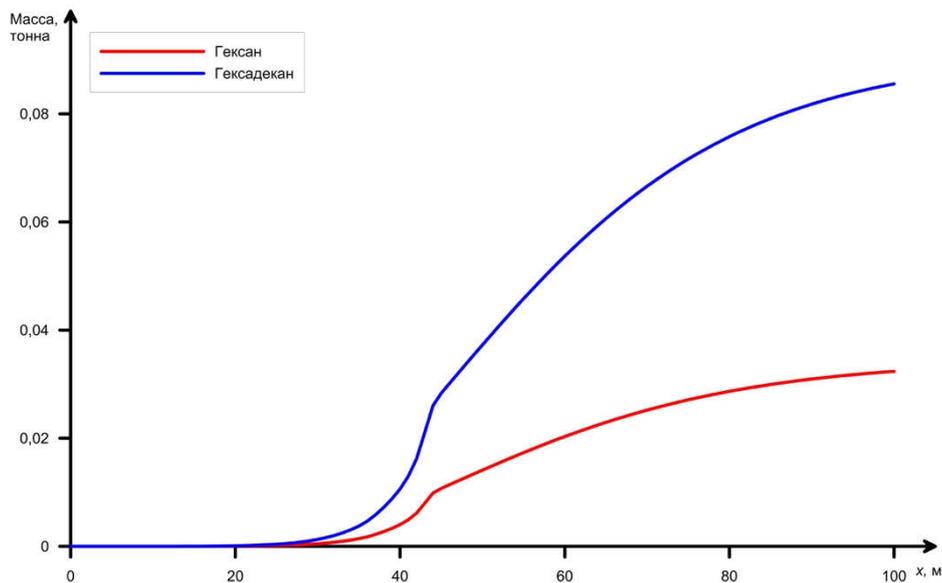
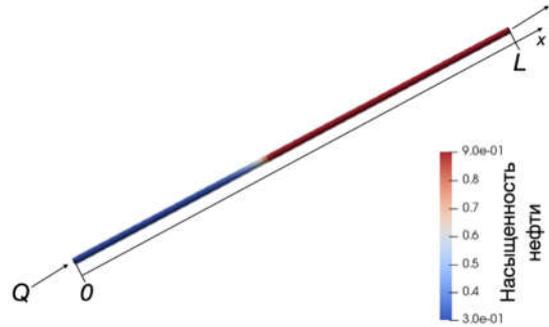


Рис. Масса гексана (красная линия) и гексадекана (синяя линия) в зависимости от координаты x в фиксированный момент времени.

Для практики представляет интерес вытеснение более тяжелых компонент нефти бензиновой и лигроиновой фракции, использующихся при производстве топлив. Первый рассмотренный состав нефти содержит пентан (C_5H_{12}) и пентадекан ($\text{C}_{15}\text{H}_{32}$), а второй – гексан (C_6H_{14}) и гексадекан ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$). Для первого состава была рассмотрена закачка воды, углекислого газа и метана, а во втором случае к этому составу был добавлен пропан. В зависимости от количества закачиваемых поровых объемов получен оптимальный состав закачиваемого вещества. Отметим, что для второго состава нефти оптимальным оказался состав закачиваемого вещества, не содержащий углекислого газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-31-80009).

БИОМЕХАНИКА ПЕРЕСТРОЙКИ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Т.Н. Чикова, В.М. Тверье, А.А. Киченко
Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь
e-mail: ChikovaTN@gmail.com

Из-за значительной лучевой нагрузки, создаваемой аппаратами для проведения томографии структуры костей, наблюдение динамики изменения ориентации костных трабекул представляется невозможным. Следовательно, для исследования таких изменений, объединённых общим названием «перестройка кости», широко применяются методы компьютерного анализа. В данной работе проведено сравнение результатов двух моделей перестройки, реализованных авторами в программных продуктах *ANSYS* и *MATLAB*. Преимущество такого анализа состоит в том, что полученные результаты расчета можно оценить не только качественно, сравнивая со внутренней структурой, реализуемой в кости человека, но и количественно, сравнивая значения параметров, характерных для выбранной модели, таких как тензор структуры и доля твердого объема. В данной работе считается, что материал кости описывается в рамках линейной теории упругости анизотропного тела, деформационное поведение которого зависит от параметров, описывающих структуру кости в каждый дискретный момент времени. Сравнение моделей проводится для различных случаев нагружения.

Практическая значимость работы заключается в создании модели перестройки кости, способной воспроизвести процесс изменения внутренней структуры под влиянием нагрузки, создаваемой врачом при различных медицинских вмешательствах. В работе описан пример такого вмешательства, заключающегося в перемещении зуба нижней челюсти.

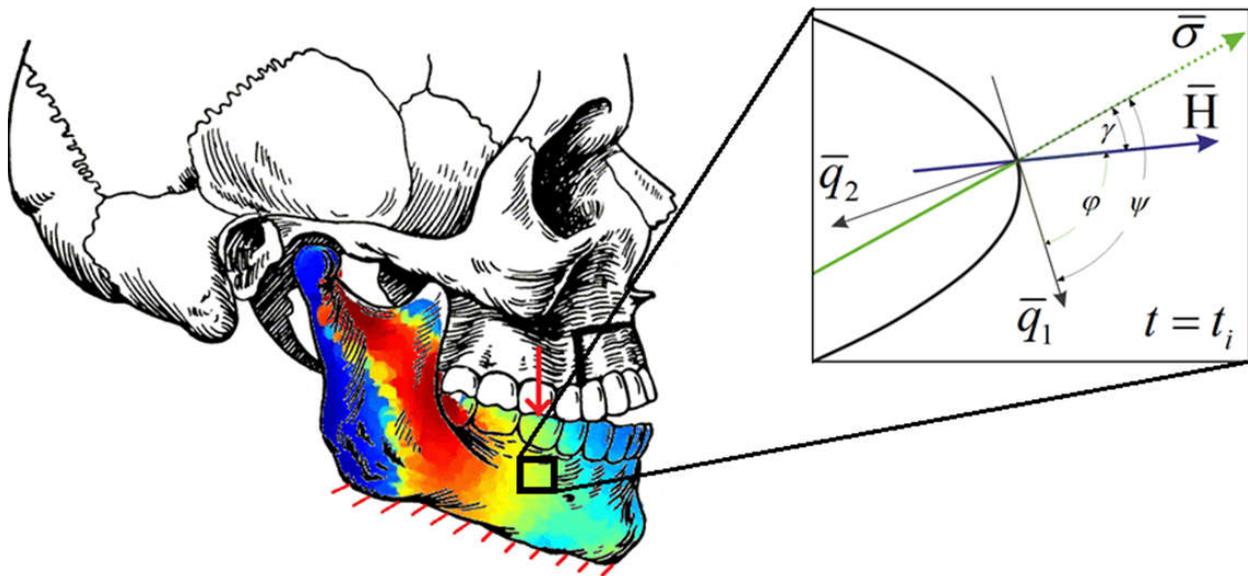


Рис. Структура участка кости в момент времени t_i

Теоретическая часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ (18-01-00589-а).

Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края.

1. Cowin S.C. An evolutionary Wolff's law for trabecular architecture // J. Biomech. Engng. – 1992. – Vol. 114. – P. 129-136.
2. Ильюшин А.А. Труды (1946-1966). Т.2. Пластичность – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
3. Киченко А.А. и др. Постановка начально-краевой задачи о перестройке трабекулярной костной ткани // Российский журнал биомеханики. 2012. Т. 16. № 4. С. 36–52.
4. Тверье В.М. Кинетические уравнения перестройки трабекулярной костной ткани в пространстве Ильюшина // Российский журнал биомеханики. 2019. Т. 23, № 2. С.293–301.
5. 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.

ИЗУЧЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ

Т.Н. Чикова

Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь

e-mail: ChikovaTN@gmail.com

В биомеханике важную роль играет количественная оценка движений человека. Среди методов исследования, одними из основных являются тензометрия и акселерометрия [1]. Современные датчики измерения деформации и ускорения имеют небольшой размер и позволяют достаточно точно отслеживать положение отдельных частей тела во времени. Построение виртуальной модели человека, копирующей движения в реальном времени, является актуальной задачей в ортопедии, биомеханике спорта, игровой индустрии. При помощи анализа полученных данных можно узнать о виде и характере физической активности (ходьба, бег) или ее отсутствия (положение лежа или сидя) у исследуемого человека, оценить правильность выполнения им упражнений во время занятий спортом или лечебной физкультурой, контролировать положение спины во время сна и в положении сидя (рис. 1). Исследование кинематики движений может помочь при лечении и профилактике развития нарушений осанки.



Рис.1. Примеры нарушения осанки при различных положениях тела [3].

Целью данного исследования является разработка системы мониторинга биомеханических характеристик положения тела человека на основе датчиков измерения ускорения и деформации с использованием платформы Arduino [2], а также обзор существующих на рынке решений. В работе рассматриваются результаты работы системы на нескольких примерах, проводится сравнение с данными, полученными с запатентованных носимых устройств.

В перспективе, результаты данного исследования могут способствовать улучшению конструкции путем интеграции в нее других датчиков и компонент и улучшению программного обеспечения, осуществляющего обработку и вывод полученной информации.

1. Tianhao Yu. Design and development of a posture monitoring seat backrest using an electro-textile sensor matrix. – a thesis submitted to The University of Manchester for the degree of MPhil Textile Science and Technology in the Faculty of Science and Engineering. – 2016. – 85 p.

2. Яценков В. Здоровье, спорт и окружающая среда в проектах Arduino. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 336 с.

3. Сайт клиники физиотерапии и спорта “Body in motion”. – URL: <https://www.bodyinmotion.co.uk/>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКИ В РАМКАХ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ

А.Ю. Чулюнин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: chulyu-n@mail.ru

Исследование механизмов обтекания лунок различной глубины, является актуальной задачей современной механики. Известно, что подобные углубления являются хорошими интенсификаторами теплообмена и не вызывают при этом сильного роста коэффициента гидравлического сопротивления. В зависимости от отношения максимальной глубины H и диаметра пятна D принято различать мелкие ($H/D < 0.125$), умеренные ($0.125 < H/D < 0.25$) и глубокие ($H/D > 0.25$) лунки [1]. В мелких лунках течение безотрывное, а в умеренных – возникают характерные вихревые структуры в виде симметричной двухъячейистой области рециркуляционного течения. В глубоких лунках стационарные схемы течения оказываются неустойчивыми, наблюдается формирование нестационарного течения с непериодическим чередованием «левостороннего» и «правостороннего» несимметричных режимов. Последние работы (например, [2]) показывают, что эффективная форма вихрегенератора – овално-траншейная лунка (ОТЛ).

В работе на базе численного моделирования исследуется структура течения в глубоких овално-траншейных лунках, расположенных различными углами к набегающему потоку, на нижней стенке плоскопараллельного канала. Траншея представляет собой две половинки полусферической лунки радиуса R , соединенных между собой полуцилиндрической вставкой, длина которой L варьируется в широком диапазоне. Для дискретизации расчетной области применялась неструктурированная сетка размером до 15 млн. элементов. Число Рейнольдса вычисленное по скорости потока на входе в канал и диаметру начального пятна лунки изменяется в диапазоне от 10^4 до 10^5 .

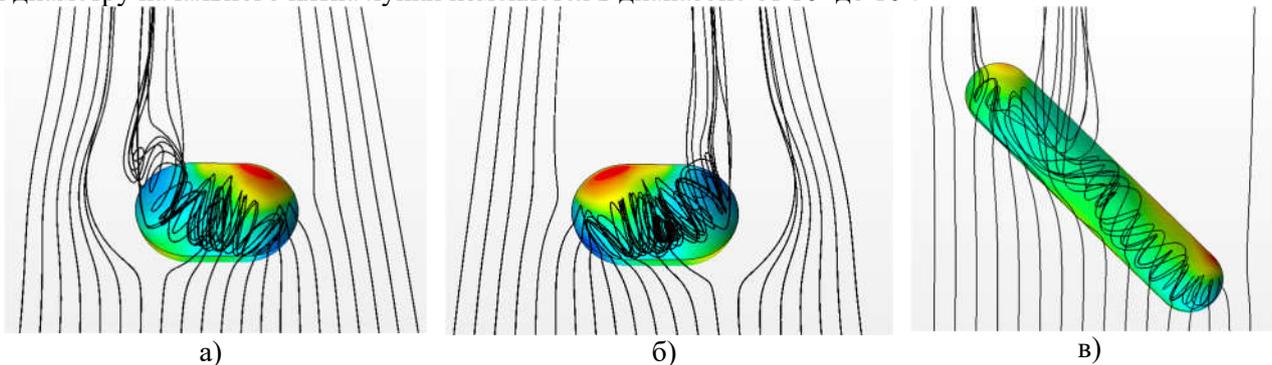


Рис. 1. Структуры квазиустановившегося обтекания овалной лунки при: а, б) $L=R$, полученные при разных начальных условиях в) $L=6R$, наклон 45 градусов.

В ходе проведения вычислительного эксперимента выявлено, что увеличение длины цилиндрической части лунки от 0 до $L=R$ приводит к стабилизации течения, воспроизводятся два устойчивых стационарных состояния, характеризующиеся одноядерными вихревыми структурами, начинающимися на внутренних стенках концевых сферических скруглений траншеи и выходящих во внешнюю пристеночную область течения в районе противоположных концов траншеи (Рис.1а, б). Конкретная конфигурация зависит от предыстории установления, в частности – от начальных условий задачи. Дальнейшее увеличение длины лунки, а также поворот лунки относительно набегающего потока устраняет неоднозначность решения и приводит к новым, более сложным вихревым структурам (Рис.1в).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-01-00242).

1.Гувернюк С.В., Чулюнин А.Ю. Метастабильные отрывные структуры при турбулентном обтекании круглых и овалных лунок // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45, № 17. С. 43–46

2.Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I. and Sudakov A. Simulation of vortex heat transfer enhancement in the turbulent water flow in the narrow plane-parallel channel with an inclined oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Energies. 2019. Vol.12, No.1296.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ГЛУБОКИХ ЛУНОК

А.Ю. Чулюнин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: chulyu-n@mail.ru

Изучение луночных углублений и их характеристик уже длительное время остается актуальной задачей современной механики и теплофизики. Подобные углубления являются хорошими интенсификаторами теплообмена, не вызывающими, при этом существенного роста гидравлического сопротивления [1]. На практике это свойство применяется при разработке теплообменных устройств макро- и микро-масштабов. Структура обтекания подобных углублений существенно зависит от относительной глубины (H/D). Так называемые «мелкие» лунки ($H/D < 0.25$), характеризуются стационарным режимом обтекания, при котором в большинстве случаев, наблюдаются два симметричных вихря. При повышении отношения H/D до 0.25 стационарная структура потока в окрестности лунки разрушается и наблюдается формирование несимметричного течения с непериодическим чередованием «левостороннего» и «правостороннего» режима.

В настоящем исследовании проводится численное моделирование обтекания глубокой лунки ($H/D=0.5$) турбулентным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Лунка располагается на нижней стенке плоскопараллельного канала, высотой $0.83 D$. Входная и выходная границы канала расположены на расстоянии $4.5D$, а расстояние от кромки лунки до боковых стенок канала составляет 1.5 . Для описания турбулентного течения используется метод моделирования крупных вихрей (LES) с подсеточной моделью WALE [2]. Расчеты проведены для двух чисел Рейнольдса, вычисленных по диаметру лунки, $Re_D = 10\,000$ и $Re_D = 40\,000$. Для генерации турбулентности на входе использовался метод SEM (Synthetic Eddy Methods) [3].



Рис. Структура потока в окрестности лунки при $Re_D = 40\,000$. а) Осреднения по 3м циклам переключения, б) Осреднения в рамках одного режима.

Проведенные расчеты показали, что на наличие переключающихся режимов, кроме глубины лунки оказывает влияние и число Рейнольдса. Получено, что при $Re_D = 10\,000$ внутри лунки формируется практически симметричная вихревая структура, несимметричные переключающиеся структуры отсутствуют. Существенно иная картина формируется при увеличении числа Рейнольдса до $40\,000$. Наблюдается наличие переключающихся режимов, которые представляют собой одноядерные наклонные вихревые структуры, которые начинаются в одном конце лунки, пересекают продольную плоскость симметрии и выходят с противоположенного конца. Осреднение по трем циклам дает в среднем близкую к симметричной картину, которая при этом отличается от полученной для $Re_D = 10\,000$. Кроме того, было проведено осреднение за период существования одного режима, в этом случае получается характерная одноядерная вихревая структура.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-01-00242)

1. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. - М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008, с цв.вкладкой

2. Nicoud, F. and Ducros, F., 1999. "Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor," Flow, Turbulence and Combustion, 62, pp. 183-200.

3. Jarrin, N., Benamadouche, S., Laurence, D., and Prosser, R. 2006. "A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large eddy simulations". International Journal of Heat and Fluid Flow, 27, pp. 585-593.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЛОПИРОВАНИЯ ПРОВОДОВ С ГОЛОЛЁДОМ

Р.А. Шавня

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва

e-mail: shavnya.ruslan@yandex.ru

Пляска проводов воздушных линий электропередачи представляет собой самовозбуждающийся колебательный процесс с аэродинамической обратной связью, обусловленной изменением действующей на провод с гололедом подъемной силы при изменении угла атаки. Пляска относится к низкочастотным видам колебаний (0.15–1.0 Гц) и характеризуется значительными амплитудами [1, 2]. Наиболее опасной, как правило, является однополуволновая пляска, при которой амплитуды вертикальных колебаний проводов и соответствующие вариации силы натяжения максимальны [3].

Многочисленные наблюдения и экспериментальные исследования показывают, что при пляске, наряду с выраженными вертикальными движениями проводов, имеют место синхронизированные с ними крутильные колебания. Закручивание сечения провода приводит к дополнительному увеличению подъемных сил и, как следствие, амплитуд пляски по сравнению с «чистым» вертикальным движением проводов по Ден-Гарту [1].

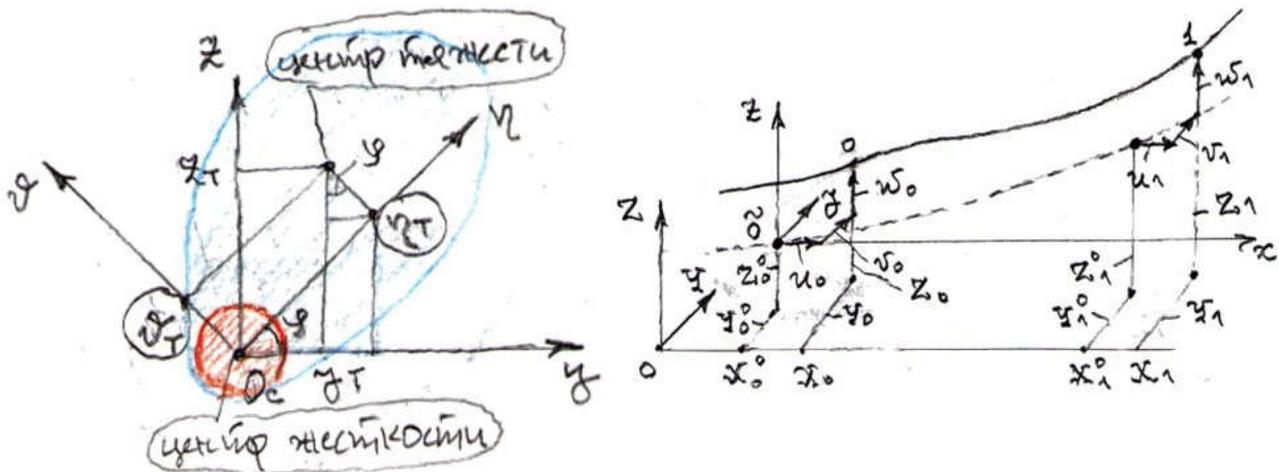


Рис. Сечение провода со льдом (слева), изображение элемента провода 0-1 в глобальной OXYZ и элементной Oxyz системах координат при последовательности перемещений u-v-w (справа).

В модели провод разбивается на конечные элементы, его относительное удлинение записывается с учетом влияния температурного расширения и технологического запаса по длине. Угол кручения сечения и осевые перемещения записываются в пределах элемента по методу Ритца. Считаем, что системы координат сечения льда и провода связаны жестким образом, их начала лежат в центре жесткости системы. Динамика процесса описывается с помощью принципа Д'Аламбера-Лагранжа: вычисляются вариации потенциальной энергии системы, работы инерционных и внешних сил, определяются коэффициенты при вариациях обобщенных координат.

Получившаяся система нелинейных дифференциальных уравнений приводится к форме Коши и интегрируется численно. Начальные условия для интегрирования находятся из решения задачи статики, уравнения которой получаются путем исключения инерционных членов из динамической задачи. Решать задачу статики можно с помощью метода продолжения по параметру.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект #20-08-00891.

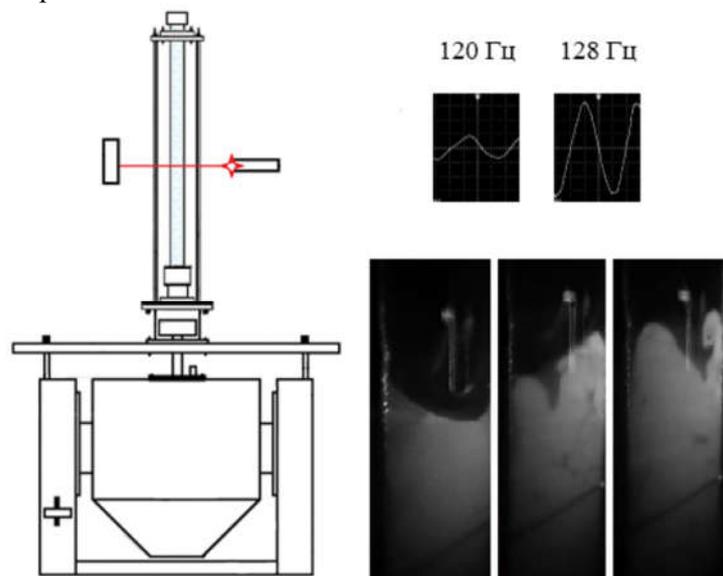
1. CIGRÉ Technical Brochure 322, "State of the art of conductor galloping", by Task Force B2.11.16, Sept 2003.
2. Виноградов А.А., Данилин А.Н., Рабинский Л.Н. Деформирование многослойных проволочных конструкций спирального типа. Математическое моделирование, примеры использования. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 168 с.
3. Havard D.G. Detuning for controlling galloping of single conductor transmission lines // IEEE Symposium on Mechanical Oscillations of Overhead Transmission Lines. Paper A 79 500-0. – Vancouver, Canada. July 1979.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АЭРОЗОЛЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В РЕЗОНАТОРЕ

Л.Р. Шайдуллин

¹Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань
e-mail: liqn@mail.ru

Серьезной проблемой загрязнения окружающей среды являются выбросы частиц аэрозоля микронного размера, связанные с дымовыми газами сжигания ископаемого топлива, химическим взаимодействием газов, измельчением твердых тел [1]. Для удаления частиц были разработаны различные технологии, такие как электрофильтры, высокоэффективные фильтры, обладающие низкой эффективностью. Ранее были проведены различные исследования резонансных режимов коагуляции и осаждения частиц [2, 3], доказавших свою эффективность в простых установках в виде трубы. Как известно, современные технические системы обладают компактностью и технологически сложностью конструкции. В связи с этим исследуются нелинейные колебания газа и аэрозоля в резонаторах различной формы и размеров.



Исследования ведутся в широком диапазоне частот и амплитуд возбуждения. Получена визуализация процесса осаждения аэрозоля в резонаторе при вынужденных колебаниях среды. Выявлены особенности изменения концентрации частиц от времени при различных начальных концентрациях. Дано сравнение для осаждения аэрозоля в трубе со скачком сечения от осаждения в гладкой трубе в безударно-волновом режиме колебаний.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 19-01-00442 и гранта президента Российской Федерации (номер гранта МК-297.2020.1).

1. Медников Е. П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. // М.: Изд-во АН СССР. 1963. 263 с.

2. Губайдуллин Д. А., Зарипов Р. Г., Ткаченко Л. А., Шайдуллин Л. Р. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения газозвеси в закрытой трубе при переходе к ударно-волновому режиму // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 3. С. 484–486.

3. Губайдуллин Д. А., Зарипов Р. Г., Ткаченко Л. А., Шайдуллин Л. Р. Динамика табачного дыма при резонансных колебаниях в закрытой трубе // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 2. С. 312-315.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЗЫРЕВИДНОГО РАСПАДА ЗАМКНУТОГО ВИХРЕВОГО ПОТОКА НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Б.Р. Шарифуллин, 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. Особое внимание при исследовании ограниченных вихревых течений уделяется изучению распада вихря из-за важных приложений в химических, биологических и энергетических технологиях. Изучение природы распада вихря часто проводится в цилиндрическом контейнере, из-за канонической формы геометрии и малого количества определяющих параметров. Сравнительно недавно внимание исследователей привлекли двух-жидкостные вращающиеся течения в связи с развитием вихревых биореакторов. Для повышения эффективности работы вихревых устройств, таких как вихревые биореакторы, необходимо комплексное исследование структуры вихревых течений и процессов массопереноса.

В работе было проведено экспериментальное исследование структуры вихревого течения двух несмешиваемых жидкостей в замкнутом цилиндрическом контейнере. В работе показано, что распад вихря в зависимости от свойств и объемов жидкостей может происходить (а) в верхней [1], (б) в нижней [2] или (в) в обеих жидкостях одновременно. Опыты проводились в цилиндрическом контейнере с радиусом $R = 45$ мм и высотой $h = 2,5R$ с верхним торцом, вращающимся с угловой скоростью ω . В качестве верхней жидкости использовалось подсолнечное масло ($\rho_o = 920$ кг/м³, $\nu_o = 49$ мм²/с), нижней - водный раствор глицерина. Толщина слоя верхней жидкости $h_o = 1R$, а нижней $h_g = 1.5R$. Скорость вращения характеризуется числом Рейнольдса $Re = \omega R^2/\nu_o$. Для изучения структуры потока применялся метод цифровой трассерной визуализации.

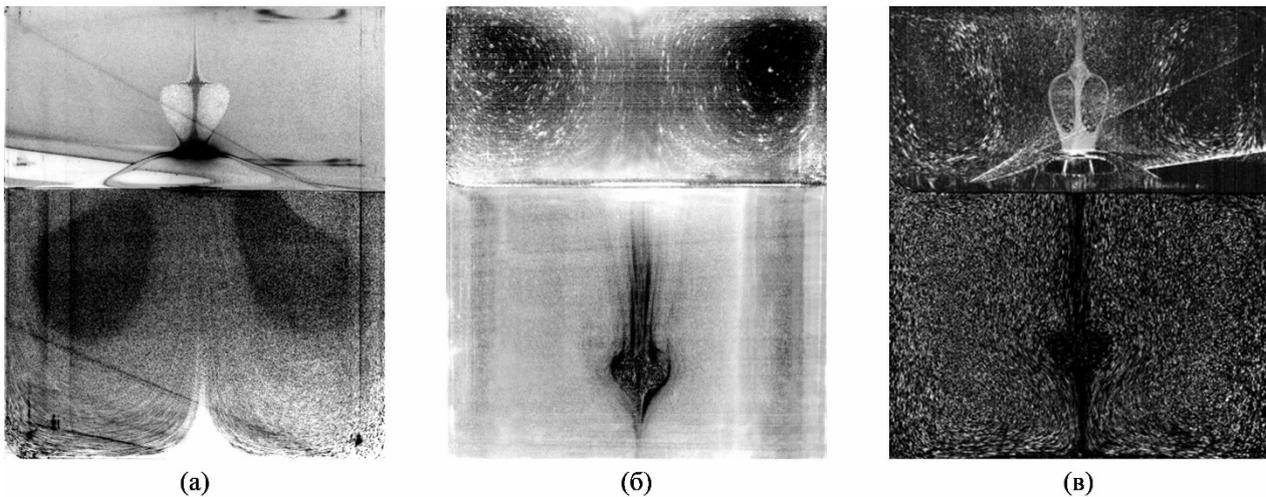


Рисунок 1: Распад вихря (а) в верхней жидкости, (б) в нижней жидкости, (в) в обеих жидкостях.

На рисунке 1(а) показан пример распада вихря, наблюдаемый в верхней жидкости при $Re = 800$, в то время как в нижней жидкости (водный раствор глицерина с $\rho_g = 1208$ кг/м³ и $\nu_g = 43$ мм²/с) распада вихря не происходит. На рисунке 1(б) показан распад вихря в нижней жидкости (дистиллированная вода) при $Re = 300$. На рисунке 1(в) показан распад вихря в верхней и в нижней жидкости (водный раствор глицерина с $\rho_g = 1070$ кг/м³ и $\nu_g = 3$ мм²/с) при $Re = 700$. Таким образом, двух-жидкостный вихревой поток можно эффективно контролировать, выбирая соответствующие объемы и свойства жидкостей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00508.

1. Naumov I.V., Glavny V.G., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Formation of a thin circulation layer in a two-fluid rotating flow // *Phys. Rev. Fluids*, 2019, vol. 4, 054702.

2. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Vortex breakdown in the lower fluid of two-fluid swirling flow // *Phys. Fluids*, 2020, vol. 32, 014101.

Научное издание

***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ-МЕХАНИКОВ***

(3–13 сентября, 2020 г.; Сочи, "Буревестник" МГУ)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Публикуется в авторской редакции с оригинал-макета,
подготовленного в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова.

Подписано в печать 17.08.2020
Печать офсетная

Формат 60x90 1/8
Усл. печ. л. 20.5

Бумага офсетная №1
Тираж 120 экз.

Издательство Московского университета
119191, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15
(ул. Академика Хохлова, д. 11)

Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ
119192, Москва, Мичуринский пр., д. 1