



НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ

***4–14 СЕНТЯБРЯ 2023
СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ***

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 531/534

ББК 22.2

В 84

Ответственные редакторы и составители:

А.А. Афанасьев, М.С. Макарова, А.М. Чайка, О.О. Иванов, А.А. Чернова

В84 Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2023. Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2023 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2023. – 122 с. – (Электронное издание сетевого распространения).

ISBN 978-5-19-011928-2 (e-book)

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

Мероприятие организовано при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы центра «Сверхзвук» (соглашение № 075-15-2022-331 от 26.04.2022 г.).

УДК 531/534

ББК 22.2

ISBN 978-5-19-011928-2 (e-book)

© Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова, 2023

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

Ю.А. Баимова (ИПСМ РАН, Уфа); А.М. Гайфуллин (ЦАГИ, Москва); П.Ю. Георгиевский (МГУ, Москва); В.В. Измоденов (МГУ, Москва); Е.В. Кустова (СПбГУ, Санкт-Петербург); В.П. Матвеев (ИМСС УрО РАН, Пермь); Н.В. Никитин (МГУ, Москва); Н.А. Прибатурин (ИТ СО РАН, Новосибирск); М.Г. Широбоков (ИПМ РАН, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Баимова Ю.А.</i>	9
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СКОМКАННОГО ГРАФЕНА: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	
<i>Гайфуллин А.М.</i>	10
ТЕОРИЯ СТРУЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ. ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ.	
<i>Георгиевский П.Ю.</i>	11
Г.Г. ЧЁРНЫЙ – ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, КОТОРЫЙ УМЕЛ ПРОСТО РАССКАЗЫВАТЬ О СЛОЖНОМ	
<i>Горячева И.Г.</i>	12
МЕХАНИКА ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ТРИБОЛОГИИ	
<i>Измоденов В.В.</i>	13
АВТОСТОПОМ ПО «ГАЛАКТИКЕ»: МЕЖЗВЕЗДНАЯ МИССИЯ ВОЯДЖЕРОВ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАГАДКИ	
<i>Кустова Е.В.</i>	14
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ: ОТ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ РАВНОВЕСИЯ	
<i>Матвеев В.П.</i>	15
SMART-МАТЕРИАЛЫ: НОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕХАНИКИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ	
<i>Никитин Н.В.</i>	16
ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	
<i>Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д.</i>	17
ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ	
<i>Широбоков М.Г., Корнеев К.Р., Перепухов Д.Г.</i>	18
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
<i>Абушахманова З.Р., Масталыгина Е.Е., Пантюхов П.В.^{1,2}, Попов А.А.</i>	19
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА НА СПОСОБНОСТЬ К ДЕГРАДАЦИИ СМЕСЕЙ ПОЛИМЕРОВ	
<i>Афанасьев А.А.</i>	20
ПРИЕМИСТОСТЬ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ ОТЛОЖЕНИИ СОЛИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ	
<i>Агеев А.И., Вигдорович И.И., Манаенкова Т.А.</i>	21
ЗАКОНЫ ДЕФЕКТА СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ	
<i>Алексеев М.С., Ганченко Г.С., Шелистов В.С., Демехин Е.А.</i>	22
МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРКОНЦЕНТРАЦИИ АНАЛИТА В МИКРОУСТРОЙСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	
<i>Амелюшкин И.А., Кудров М.А., Кулешов П.С., Морозов А.О.</i>	23
УПРАВЛЕНИЕ ТРЕНИЕМ ЖИДКОСТИ ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ ГИДРОФОБНЫМИ СВОЙСТВАМИ	
<i>Андреева А.И., Афанасьев А.А.</i>	24
ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ	

<i>Безверхий Д.С., Кондратьев Н.С.</i>	25
ИДЕНТИФИКАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ	
<i>Буковский П.О., Щербакова О.О., Муравьева Т.И., Шпенев А.Г.</i>	26
ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЕВ ТКАНИ В ВОЛОКНИСТОМ ТКАНЕВОМ КОМПОЗИТЕ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	
<i>Варьян И.А., Тюбаева П.М., Попов А.А.</i>	27
ВЛИЯНИЕ ГЕМИНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОФОРМОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3-ГИДРОКСИБУТИРАТА	
<i>Варьян И.А., Колесникова Н.Н., Попов А.А.</i>	28
СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА И ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ В ПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТАХ, ОБЛАДАЮЩИХ УСКОРЕННОЙ БИОДЕГРАДАЦИЕЙ	
<i>Веденеев В.В., Подопросветова А.Б.</i>	29
КОНФИГУРАЦИИ КРИВЫХ, ПРИТЯГИВАЮЩИХ СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ ПРОТЯЖЁННЫХ ОДНОМЕРНЫХ СИСТЕМ	
<i>Ветрова А.В., Козулин А.А.</i>	30
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПРОВОЛОК ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
<i>Володин И.В., Алабужев А.А.</i>	31
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ	
<i>Галишевский В.А., Кучинский М.О., Рыбкин К.А., Любимова Т.П.</i>	32
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОЗДУШНЫЙ ПУЗЫРЕК ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ	
<i>Ганченко Г.С., Шелистов В.С., Попов В.А., Пономарев Р.Р., Демехин Е.А.</i>	33
ЭЛЕКТРОФОРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ С ТОНКОЙ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОБОЛОЧКОЙ	
<i>Гарбуз М.А.</i>	34
ПОДСКОК ВИБРАЦИОННОГО РОБОТА	
<i>Гареев Л.Р., Иванов О.О., Веденеев В.В.</i>	35
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛАМИНАРНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ	
<i>Глазунова И.А., Трофимов С.П., Целоусова А.А.</i>	36
ОДНОПУСКОВОЕ РАЗВЁРТЫВАНИЕ ЛУННОЙ КОНСТЕЛЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАВИТАЦИИ СОЛНЦА	
<i>Голиков А.Е., Макаренко Н.И.</i>	37
НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЦИЛИНДРА ПОД СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	
<i>Голованов С.А.</i>	38
ПРЕОДОЛЕНИЕ КРАЕВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГУСЕНИЧНЫМ РОБОТОМ	
<i>Голуб А.П.</i>	39
ДИНАМИКА ТРЁХЗВЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА	
<i>Гречко С.С.</i>	40
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЯ СОЛИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПРИ НАГНЕТАНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ	
<i>Демченко Я.В., Веденеев В.В., Зубков А.Ф.</i>	41
РЕЗОНАНСНЫЕ КРУТИЛЬНЫЕ АЭРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА КОНЕЧНОГО РАЗМАХА В УПРУГОМ ПОДВЕСЕ	

<i>Денисов Е.А.</i>	42
МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОСМИЧЕСКОГО ЛИФТА	
<i>Евко Е.А., Пузина Ю.Ю.</i>	43
ВЛИЯНИЕ МОНОДИСПЕРСНОЙ ЗАСЫПКИ НА КОЛЕБАНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ	
<i>Загайнов И.А., Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А.</i>	44
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ PIV НА СВЕРХЗВУКОВОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ	
<i>Загайнов И.А., Попович С.С., Егоров К.С.</i>	45
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЗАСЕВА СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В СИСТЕМЕ PIV	
<i>Иванова А.А., Мурсенкова И.В.</i>	46
ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПРЕПЯТСТВИИ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА	
<i>Иванов О.О., Веденеев В.В.</i>	47
МОДИФИКАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА В ПОТОКЕ ГАЗА ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ	
<i>Каменских А.А., Крысина А.С., Панькова А.П.</i>	48
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
<i>Каменских А.А., Горохов А.Ю., Кузнецова Ю.С., Абляз Т.Р., Муратов К.Р.</i>	49
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЭЛЕКТРОДА	
<i>Каменских А.А., Лесникова Ю.И., Стражец Ю.А.</i>	50
ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНА ТИПА PANDA НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОВАРИАНТНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	
<i>Карнозова Е.А., Знаменская И.А.</i>	51
ЭВОЛЮЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ И ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТЕНКИ КАНАЛА	
<i>Кирсанова А.С.</i>	52
КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МОДЕЛИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ДАРЬЕ	
<i>Кирюшина М.А.</i>	53
КВАЗИГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ И ЕГО ТЕСТИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ТЕПЛОВОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ	
<i>Клюев Н.А., Жданова Н.С., Васильев О.В.</i>	54
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕНАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ФУНКЦИЙ	
<i>Конурин Д.В., Чуйкин Р.А.</i>	55
МЕТОДЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ	
<i>Копылов А.Я., Знаменская И.А.</i>	56
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ	
<i>Коровайцева Е.А.</i>	57
О ДВУХ ПОСТАНОВКАХ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ВЫСОКОЭЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА	
<i>Косьянчук В.В.</i>	58
ТЕЧЕНИЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В МИКРОКАНАЛЕ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ	

<i>Краснопольский Б.И., Клушин М.Д., Куликов Ю.М., Чулюнин А.Ю., Чупров П.А.</i> ОСРЕДНЕНИЕ ПО ВРЕМЕНИ И ПО АНСАМБЛЮ ПРИ РАСЧЕТЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ	59
<i>Кручинин М.М.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСАДКИ ВЕРТОЛЕТА	60
<i>Кучинский М.О., Садовникова А.Д., Рыбкин К.А., Любимова Т.П.</i> ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА	61
<i>Леонтьева А.В.</i> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ДИСПЕРСИЮ И НЕЛИНЕЙНУЮ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ЛОКАЛИЗАЦИЮ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В МАТЕРИАЛАХ	62
<i>Лисицын А.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ГРАНУЛИРОВАННЫМИ ПРЕГРАДАМИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ С УЧЁТОМ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ	63
<i>Лобанов П.Д., Светоносков А.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ	64
<i>Лутхов А.И., Глаголев Л.В.</i> К НАХОЖДЕНИЮ ПОТОКА УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ВЕРШИНУ ФИЗИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА И РАБОТЫ УЗЛОВЫХ СИЛ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТУПИКОВОГО ЭЛЕМЕНТА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО КОНТИНУУМА	65
<i>Макарова М.С., Луцик В.Г., Попович С.С.</i> ТУРБУЛЕНТНЫЕ ЧИСЛА ШМИДТА И ПРАНДТЛЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА СТЕНКЕ С ЗАВЕСНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРИ ВДУВЕ ИНОРОДНОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ВСТАВКУ	66
<i>Макарова М.С., Луцик В.Г., Попович С.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СДВИГОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	67
<i>Макаров Г.Р., Охитина А.С.</i> ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ	68
<i>Масталыгина Е.Е., Алексанова Е.А., Прокопович К.В., Кузьмин А.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЕССОВАНИЕМ, ЛИТЬЁМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И МОДЕЛИРОВАНИЕМ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПРАВЛЕНИЯ	69
<i>Медведева Т.Н.</i> ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ N-ЗВЕННОГО ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА	70
<i>Меркулов Д.И., Пелевина Д.А.</i> ТЕЛА ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	71
<i>Михальченко Е.В., Никитин В.Ф.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ В ДЕТОНАЦИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ	72

Мухачев Б.О., Ткачев С.С. МЕТОДИКА РАСЧЁТА СИЛЫ И МОМЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ	73
Насырова Д.А., Башмаков Р.А. СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЖИДКОСТИ В НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЕ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ	74
Носов Ю.О., Каменских А.А. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	75
Носов Ю.О., Каменских А.А., Николаев А.В., Аль-Раммахи А.А. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНОЙ ИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПЕРЕМЫЧКИ	76
Носов Ю.О., Каменских А.А., Ковыляева М.С. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗУБА С НЕКАРРИОЗНЫМ ПОРАЖЕНИЕМ ДО И ПОСЛЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ	77
Окулов А.В., Степченко А.К., Коробов Ю.С., Макаров А.В., Юсупова О.С., Корх Ю.В., Кузнецова Т.В., Харанжевский Е.В. РАЗРАБОТКА ПРОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ FeNiCr-B₄C ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ	78
Орлов В.В., Иванов Д.С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ФЕМТОСПУТНИКОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА АНТЕНН СВЯЗИ	79
Панькова А.П., Каменских А.А., Носов Ю.О. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ВЫБОРА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	80
Панькова А.П., Каменских А.А., Седельникова С.С. БИОМЕХАНИКА ЗУБА С УЧЕТОМ КЛИНОВИДНОГО ДЕФЕКТА	81
Панькова А.П., Каменских А.А., Лесникова Ю.И., Стражец Ю.А. ПОВЕДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА RANDA ПРИ ОДНОСЛОЙНОМ ЗАЩИТНОМ ПОЛИМЕРНОМ ПОКРЫТИИ	82
Паришин Д.В., Тихвинский Д.В., Бервицкий А.В., Станкевич Ю.А., Куянова Ю.О. ГЕМОДИНАМИКА МАЛЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ: ТРЕНДЫ И НОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ НЕЙРОХИРУРГИИ	83
Перебухов Д.Г., Трофимов С.П., Ширококов М.Г., Корнеев К.Р. ДИНАМИКА, НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ПОЛЁТЕ К ГРАВИТАЦИОННОМУ ФОКУСУ СОЛНЦА	84
Пестов Д.А. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСТУЩИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРЕЩИН	85
Погосбекян М.Ю., Крупнов А.А. ГЕТЕРОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ УДАРНОГО СЛОЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА ДИССОЦИИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ	86
Пономарев Р.Р., Ганченко Г.С., Алексеев М.С., Моршинева И.В., Демехин Е.А. МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ АНАЛИТА В МИКРОКАНАЛЕ ОКОЛО НАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	87
Попов В.А., Ганченко Г.С., Гребнев И.И., Моршинева И.В., Демехин Е.А. ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЭЛЕКТРОФОРЕЗ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ	88

<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Загайнов И.А</i>	89
ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА НА СВЕРХЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ	
<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А.</i>	90
PIV ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОГО ТЕЧЕНИЯ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ: ПОПЕРЕЧНОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА	
<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А</i>	91
ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ПАНОРАМНЫМИ МЕТОДАМИ	
<i>Пузатова (Шаранова) А.В., Дмитриева М.А.</i>	92
РАЗВИТИЕ МЕТОДА МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ	
<i>Родионов Д.О.</i>	93
РАЦИОНАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЯДРА СВЕРТКИ РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ В КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	
<i>Романова Д.И., Кухарский А.В., Васильева Е.С.</i>	94
СРАВНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ РАСЧЁТА РАЗМЫВА ГРУНТА НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОРАНА В ПЕСЧАНОЙ ПЛОТИНЕ	
<i>Рыбкин К. А., Любимова Т. П., Кучинский М. О.</i>	95
ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ КАРТ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ СОБЫТИЙ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ	
<i>Савельев А.С.</i>	96
РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ НЕРАВНОВЕСНОГО ВКЛАДА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПОУРОВНЕВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ	
<i>Сагитов Р.В.¹, Колчанова Е.А.</i>	97
РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПОТОКА ПОСРЕДСТВОМ ОТНОШЕНИЯ ТОЛЩИН ПОДСЛОЕВ И СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ «ВОЗДУХ – ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ ПОРИСТАЯ СРЕДА»	
<i>Садовникова А.Д., Кучинский М.О., Рыбкин К.А., Любимова Т.П.</i>	98
ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДРЕЙФ И КОАЛЕСЦЕНЦИЮ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ПАВ	
<i>Селезнева Л.Д., Попов А.А., Трофимчук Е.С.</i>	99
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ФАЗОВУЮ СТРУКТУРУ РАЗРЫВНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ СМЕСЕВЫХ ПОЛИМЕРОВ ПЛА-ПБАТ	
<i>Стамов Л.И., Тюренкова В.В., Никитин В.Ф.</i>	100
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ	
<i>Старцев Н.И., Никитин Н.В.</i>	101
ЯВЛЕНИЕ УДВОЕНИЯ ПЕРИОДА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ	
<i>Стеклов Е.С., Ереев М.Н., Соловьев С.А., Патрушев В. Л., Барашков С.А.</i>	102
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ	

Суменков О.Ю. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОСТИ	103
Суменков О.Ю. ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА «ЗАСТРЕВАНИЯ» МАЯНИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	104
Сутырин О.Г., Сиренко А.Г. ИМПУЛЬСНОЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТЕНКУ С ПРИЛЕГАЮЩИМ К НЕЙ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМ ПУЗЫРЕМ ГАЗА ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ	105
Сытченко И.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ СТРАТЕГИИ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ	106
Терауд В.В. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ОБРАЗЦА ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ	107
Титова А.В., Измоденов В.В. МЕЖЗВЕЗДНЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ	108
Тихвинский Д.В., Мержоева Л.Р., Карпенко А.А., Чупахин А.П., Паршин Д.В. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И ОБЪЁМА ВНУТРИПРОСВЕТНОГО ТРОМБА НА МЕХАНИКУ АНЕВРИЗМЫ БРЮШНОЙ АОРТЫ	109
Толмачев Д.С. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО КОНВЕКТИВНОГО МАГНИТНОГО ДИНАМО ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ СЛОЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ	110
Трифонов В.В., Решмин А.И., Тепловодский С.Х. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ДИФFUЗОРНЫМ И КОНFUЗОРНЫМ КАНАЛАМИ	111
Трубников Г.И., Пацко В.С., Федотов А.А. МНОЖЕСТВО ДОСТИЖИМОСТИ МАШИНЫ ДУБИНСА С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ НА УПРАВЛЕНИЕ	112
Тузииков А.М. УПРАВЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИМ РОБОТОМ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ	113
Формалин А.В., Звягин А.В., Веденеев В.В., Колотников М.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН В ГАЗЕ	114
Франц Е.А., Крылов А.А., Шелистов В.С., Демехин Е.А. ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	115
Хасаева Т.Т. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОРОТАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ГАЛАКТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	116
Чернова А.А. РЕЖИМЫ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПЛАСТА В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	117

<i>Чичерина А.Д., Веденеев В.В.</i> БЕССЕТОЧНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ УПРУГОЙ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЁТА	118
<i>Шелистов В.С.¹, Алексеев М.С., Пономарёв Р.Р., Попов В.А., Демёхин Е.А</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ НАНОЩЕЛИ	119
<i>Шорохов В.В., Виленский О.Ю., Лапшин Д.А.</i> РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПАДЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ	120
<i>Экстер Н.М., Гареев Л.Р., Зайко Ю.С.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ УЧАСТКА ЛОКАЛЬНОЙ АБСОЛЮТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ	121
<i>Яковенко А.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ШТАМПА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА	122

ГРАФЕНА: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Баимова Ю.А.

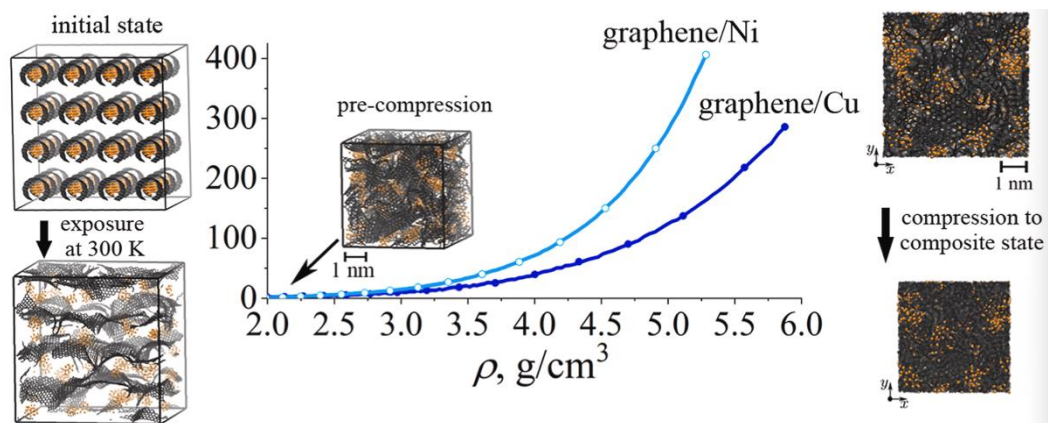
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Москва

e-mail: julia.a.baimova@gmail.com

В настоящее время разработка новых композитных материалов с улучшенными физическими и механическими свойствами представляет большой интерес для различных областей промышленности. Композиты на основе графеновой матрицы и металла в настоящее время активно исследуются как экспериментально, так и теоретически [1, 2]. Так, например, графен и структуры на его основе рассматриваются как перспективные носители для металлических наночастиц, которые одновременно могут являться катализаторами при создании функциональных композитов. Сочетание высокой удельной поверхности графеновой составляющей, высокой теплопроводности и прочности графена при высокой каталитической активности наноразмерных металлических частиц, позволяет получать композиты графен/металл, демонстрирующие широкий спектр свойств - от высокоактивных катализаторов, сверхпрочных покрытий, до компонент новой электроники и суперконденсаторов. Аналогичный подход можно применять с точки зрения их использования для хранения водорода, поскольку наночастицы металла являются центрами накопления водорода в таких материалах.

В качестве матрицы для композита выбран скомканный графен, состоящий из свернутых чешуек графена, связанных между собой силами Ван-дер-Ваальса. Поры данной рыхлой структуры заполняются наночастицами металла (Al, Ni, Cu, Ti) сферической формы. Для получения композита, начальная структура выдерживается при комнатной температуре. Далее путем приложения гидростатического сжатия убираются большие пустоты между единичными элементами будущего композита и приводятся к одинаковому размеру. Затем структуры подвергаются гидростатическому сжатию при повышенной температуре до максимально возможных плотностей. После того как была проведена деформационно-термическая обработка при разных температурах, исследуются механические свойства полученных материалов.

В работе показано, что важное влияние на формирование композита оказывает температура гидростатического сжатия. Получены композиты, обладающие высокой прочностью и пластичностью. Критическое влияние на прочность оказывает энергия взаимодействия между металлом и графеном, а также размер наночастиц металла.



Процесс получения композита на основе скомканного графена и наночастиц металла [1]

1. Safina L.R., Baimova J.A., Krylova K.A. Molecular dynamics study of the mechanical properties and deformation behavior of graphene/metal composites // *Materials Today Physics*. 2022. V. 28. P. 100851.
2. Safina L.R., Rozhnova E.A., Murzaev R.T., Baimova J.A. Effect of Interatomic Potential on Simulation of Fracture Behavior of Cu/Graphene Composite: A Molecular Dynamics Study // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13. №2. P. 916.

ТЕОРИЯ СТРУЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ. ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ.

Гайфуллин А.М.¹

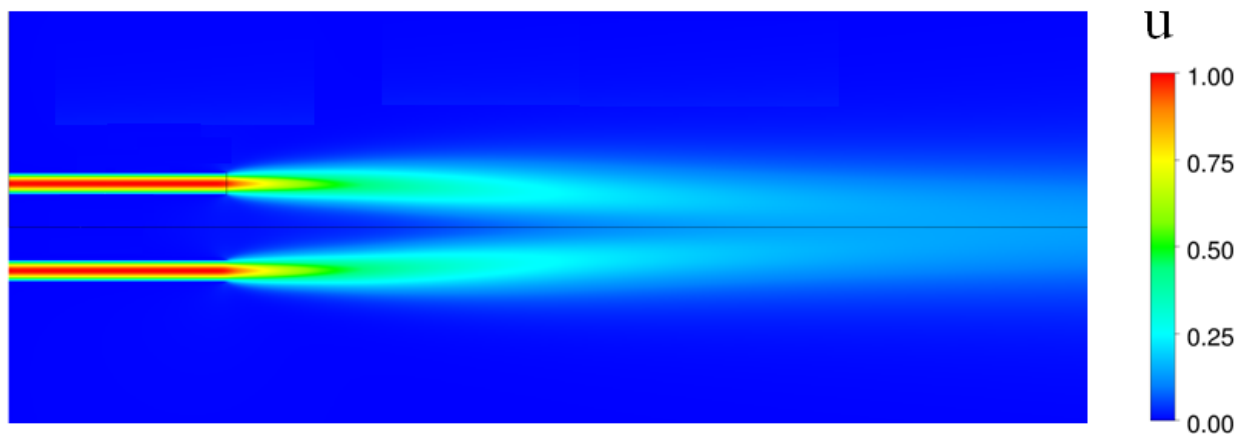
¹Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский
e-mail: gaifullin@tsagi.ru

В 2023 г. исполняется 90 лет со дня выхода первой теоретической работы по теории ламинарных струй. В 1933 г. Г. Шлихтинг опубликовал короткую статью – всего четыре страницы. В этой статье было получено решение для осесимметричных затопленных струй и заложены основы для струй плоских. За этой работой последовали другие работы, существенно расширившие горизонты теории струй: Н.А. Слезкина, Л.Д. Ландау, В.И. Яценева, М.А. Гольдштика, Н.И. Яворского, Л.Г. Лойцянского, Ю.Б. Румера, Н.И. Акатнова, М.Б. Глауэрта и многих других

В докладе представлен обзор теоретических работ по ламинарным затопленным струям. Рассмотрены задачи, связанные с плоскими и осесимметричными струями, с закрученными струями, с пристенными струями и со взаимодействием струй.

У данного доклада две цели. Первая – дать обзор основополагающих работ по теории ламинарных струй. Вторая цель – обнаружение и исправление некоторых ошибочных результатов и суждений теории струй. Ситуация усугубляется тем, что ошибки по данной тематике присутствуют и в известных монографиях, и в широко цитируемых статьях. Обнаружение этих ошибочных результатов и замена их на верные утверждения – главная цель доклада.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00210, <https://rscf.ru/project/23-11-00210/>



Взаимодействие двух закрученных осесимметричных струй [1]. Продольная компонента скорости.

1. Гайфуллин А.М., Жвик В.В. Взаимодействие двух противоположно закрученных затопленных струй // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 3. С. 48-57.

Г.Г. ЧЁРНЫЙ – ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, КОТОРЫЙ УМЕЛ ПРОСТО РАССКАЗЫВАТЬ О СЛОЖНОМ

Георгиевский П.Ю.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: georgi@imec.msu.ru

Горимир Горимирович Чёрный (22.01.1923 – 06.11.2012) – выдающийся советский и российский учёный-механик, академик АН СССР, один из признанных во всем мире основоположников гиперзвуковой аэродинамики, основатель научной школы по газовой динамике, создатель и руководитель лаборатории газовой динамики Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, один из основателей Научно-исследовательского института механики МГУ и его бессменный директор в течение 32 лет, заведующий кафедрой аэромеханики механико-математического факультета МГУ. Он оставил нам богатейшее научное наследие в виде двух монографий [1-2], курса лекций, который он читал студентам механико-математического факультета МГУ, большого количества научных статей, многие из которых вошли в сборники [3-5], и каждая из которых была посвящена решению нужных для страны задач.

В лекции будет рассказано о том, что лично меня, как студента, аспиранта, а затем и молодого исследователя, больше всего поразило в этом выдающемся человеке, и что во многом определило для меня выбор пути в науке. На основе личных воспоминаний и анализа [1-2] будут приведены некоторые примеры, иллюстрирующие особенности подхода Г.Г. Черного к решению сложных задач и преподаванию курса газовой динамики и его редкий дар просто объяснять сложное.

На третьем курсе мой учитель В.А. Левин поручил мне невыполнимую, как мне казалось, задачу – подготовить доклад о способах определения формы тел минимального сопротивления по формулам Ньютона и Ньютона-Буземана, а в качестве источника порекомендовал [1]. Ознакомившись с книгой, я был поражен – материал был изложен так, что для понимания было достаточно знаний школьного курса физики. Я тогда подумал, что Г.Г. Черный, безусловно, великий ученый, поскольку смог объяснить все так просто, что даже не обремененному специальными знаниями в области механики жидкости и газа студенту третьего курса все стало понятно. Много позже, изучая книгу [1], я понял, что формула Ньютона-Буземана является первым приближением для знаменитого метода «тонкого ударного слоя» («пограничного слоя» в авторской терминологии) Г.Г. Чёрного.

Мне посчастливилось слушать лекции Г.Г. Черного по газовой динамике на четвертом курсе механико-математического факультета МГУ в 1982 году. С самого начала я был поражен сочетанием полноты курса и математической строгости с простотой изложения. Доказывалось абсолютно все, но при этом курс был самодостаточным, а опирался лишь на самые общие знания из курса математического анализа. Газовая динамика стала тогда для меня любимой наукой (и «царицей наук» в области механики жидкости и газа) и остается таковой до сих пор. Лекции Г.Г. Черного стали самыми незабываемыми за все время обучения в МГУ.

В предисловии к [2] Г.Г. Черный выражает надежду, что «книга найдет своего читателя – и студента, и инженера, и научного сотрудника». И, действительно, книга многоуровневая, и постепенно раскрывается разными научными оттенками, как хороший дорогой коньяк! Студент найдет в ней необходимые знания для первоначального знакомства с наукой (как по мне – так это вообще единственная книга, по которой можно изучать газовую динамику); инженер – описание приближенных подходов, которые позволяют решать многие нужные прикладные задачи на «логарифмической линейке»; а научный сотрудник – описание проблем и нерешенных задач (поскольку «умение ставить правильные вопросы важнее, чем умение давать ответы на них»).

Стремление Г.Г. Черного находить простые объяснения сложным явлениям, его умение предлагать простые решения для сложных задач являются для всех нас, и, в особенности, для молодых ученых примером правильного отношения к науке.

1. Черный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959. - 219 с.
2. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука. 1988. - 424 с.
3. Газовая динамика. Избранное. В 2-х т. Под ред. А.Н. Крайко. М.: Физматлит, 2000. Т.1. - 720 с. Т.2. - 761 с.
4. Механика жидкости и газа. Избранное. Под ред. А.Н. Крайко. М.: Физматлит, 2003. Т.1. - 752 с.
5. Черный Г.Г. Избранное. М.: Наука. 2009. - 759 с.

МЕХАНИКА ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

Горячева И.Г.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: goryache@ipmnet.ru

Контактные и внутренние напряжения во взаимодействующих телах существенно зависят как от их механических характеристик, так и от свойств поверхности и подповерхностных слоев контактирующих материалов. Вследствие шероховатости поверхностей фактическая область контакта, как правило, намного меньше кажущейся (номинальной) и состоит из совокупности пятен контакта, а максимальные давления на отдельных пятнах контакта могут в десятки раз превышать значения номинальных давлений, рассчитанных в предположении гладкости взаимодействующих поверхностей. Вблизи пятен фактического контакта действуют силы адгезионного взаимодействия различной природы (молекулярные, капиллярные), которые играют важную роль при взаимодействии поверхностей, в том числе оказывают влияние на формирование силы сопротивления при их относительных перемещениях.

В докладе излагается аналитический метод исследования задач дискретного контакта упругих тел с учетом параметров их микрогеометрии, взаимного влияния пятен контакта, а также сил молекулярной и капиллярной адгезии между взаимодействующими поверхностями [1,2]. На основании развитого подхода изучается зависимость нагрузки от сближения поверхностей в цикле сближение - удаление шероховатых поверхностей, а также зависимость силы трения от параметров микрогеометрии, адгезионных и упругих свойств взаимодействующих тел при относительном скольжении шероховатых поверхностей и в условиях трения качения. Изложенный подход используется также для анализа внутренних напряжений в волокнистых (рис. 1) и тканевых композитах при разных расположениях волокон и слоев ткани к поверхности трения [3].

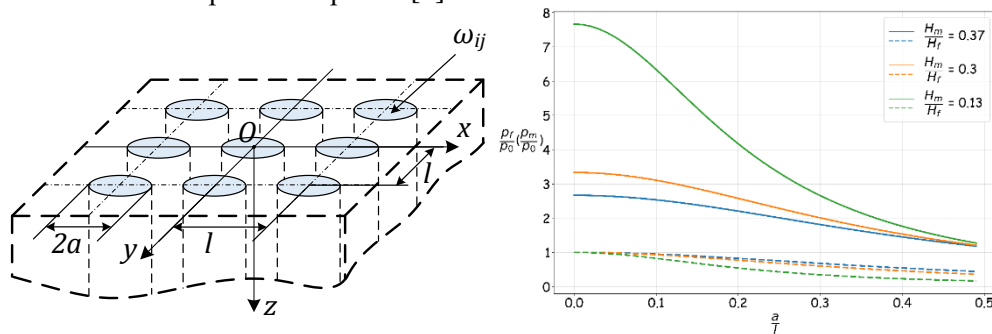


Рис. 1. Влияние структуры волокнистого композита (а) на распределение контактных давлений (б) на волокно (p_r) и матрицу (p_m) в установившемся режиме изнашивания при разных отношениях твердостей матрицы H_m и волокна H_f .

Полученные результаты позволяют разработать способы управления свойствами поверхностей взаимодействующих тел, а также структурными составляющими композиционных материалов с целью обеспечения требуемых трибологических характеристик разрабатываемых пар трения при заданных условиях контактного взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00548 П).

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.
2. Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu. Discrete contact mechanics with applications in tribology // Elsevier. 2022. 212 p.
3. Горячева И.Г., Мещерякова А.Р. Моделирование разрушения поверхностных слоев волокнистых композитов в условиях фрикционного взаимодействия // СФУ, Математика и физика. 2021. Т. 14 № 6. С. 690-699.

АВТОСТОПОМ ПО «ГАЛАКТИКЕ»: МЕЖЗВЕЗДНАЯ МИССИЯ ВОЯДЖЕРОВ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАГАДКИ

Измо́денов В.В.^{1,2}

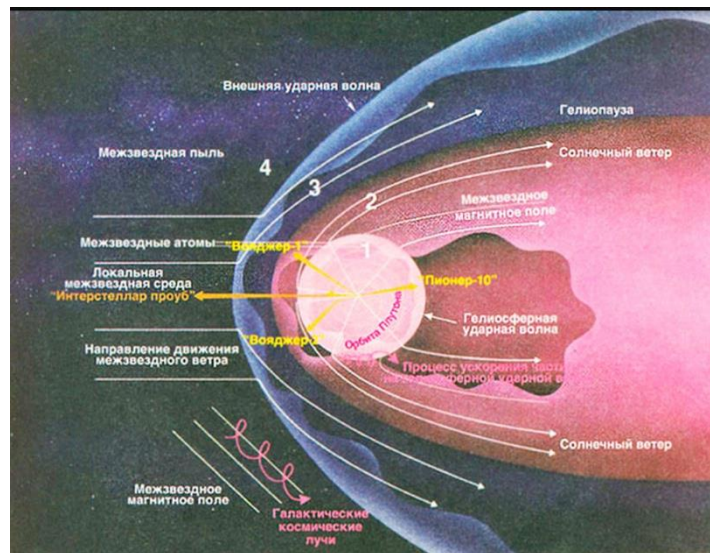
¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Институт космических исследований РАН, Москва

e-mail: izmod@cosmos.ru

В лекции будет представлена краткая история изучения границы гелиосферы (– области, где сверхзвуковой солнечный ветер встречается с межзвездной средой) глазами газодинамика. В 60-х - 70-х годах прошлого века появились пионерские работы Е. Паркера, а также сотрудников механико-математического факультета МГУ В.Б. Баранова, К.В. Краснобаева, А.Г. Куликовского [1] в которых были построены первые модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. В работе [1] решалась газодинамическая задача о взаимодействии сверхзвукового источника (солнечного ветра) со сверхзвуковым потоком межзвездной среды. При таком взаимодействии возникает газодинамическая структура с двумя ударными волнами – гелиосферной ударной волной, внешней ударной волной, - и разделяющим их тангенциальным разрывом - гелиопаузой. Область между ударными волнами называется гелиосферным ударным слоем. В [1] в приближении тонкого слоя методом Г.Г. Черного была рассчитана структура течения в области ударного слоя. В 2004 г. и 2007 г. космические аппараты Вояджер 1 и 2 пересекли гелиосферную ударную волну, соответственно, а в 2012 г. и 2018 г. – гелиопаузу. Таким образом, предложенная в [1] качественная структура течения была подтверждена экспериментально спустя более чем 40 лет.

В лекции будет рассказано 1) как необходимость анализа данных, а также планирования будущих космических экспериментов, привело к развитию модели [1] в современную трехмерную кинетико-магнитогидродинамическую модель гелиосферы, 2) какие ожидаемые и неожиданные открытия были сделаны космическими аппаратами Вояджер 1 и 2, SOHO и IBEX, 3) какие данные Вояджеров не удастся объяснить в рамках существующих моделей, и в каком направлении необходимо развивать существующие модели. Также будет рассказано о задаче, которую пропустили классики и которую решил аспирант мехмата МГУ Сергей Корольков [2].



Качественная картина взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой.

В лекции представлены результаты, которые были получены в рамках гранта Российского научного фонда № 19-12-00383.

1. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. АН СССР. 1970. Т. 194. С. 41–44.

2. Korolkov S., Izmodenov V. [New unexpected flow patterns in the problem of the stellar wind interaction with the interstellar medium: stationary ideal-MHD solutions](#) // MNRAS. 2021. V. 504. doi:10.1093/mnras/stab1071.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕЧЕНИЙ: ОТ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ РАВНОВЕСИЯ

Кустова Е.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
e-mail: e.kustova@spbu.ru

Неравновесные состояния газа повсеместно встречаются в задачах высотной аэродинамики, газовой динамики, в низкотемпературной плазме, микротехнике. Степень отклонения от равновесия определяется степенью разреженности газа, а также соотношением между характерными временами физико-химических процессов, происходящих в газе, и временем изменения макроскопических характеристик течения. Для описания неравновесных течений применяются как кинетические методы динамики разреженного газа, так и континуальные подходы механики сплошной среды. В зависимости от соотношения характерных времен могут строиться модели разной степени сложности и детальности [1].

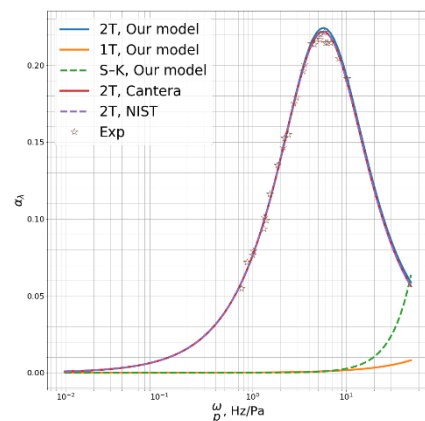
Данный доклад посвящен построению и реализации математических моделей неравновесных течений с помощью континуального подхода на основе обобщенного метода Чепмена-Энскога с учетом быстрых и медленных процессов. Будут рассмотрены следующие вопросы:

1. Модели слабонеравновесных течений с учетом релаксационных процессов на уровне коэффициентов переноса, в частности, объемной вязкости. Объемная вязкость была впервые обнаружена в работах Мандельштама и Леонтовича [2], а позднее – Тиссы [3] в 1930-40 гг. С тех пор в научном сообществе было много дискуссий о роли объемной вязкости, появлялись достаточно противоречивые результаты. В докладе будут освещены основные причины некорректной интерпретации явления объемной вязкости на примере задачи о распространении малых возмущений в многоатомном газе [4].

2. Модели сильнонеравновесных течений (поуровневые и многотемпературные). Такие течения возникают за ударными волнами, в соплах, разрядах и требуют совместного рассмотрения сложной колебательно-химической кинетики, газовой динамики и процессов переноса. На примере задачи о кинетике углекислого газа будут рассмотрены преимущества и недостатки детальных и сокращенных моделей, способы повышения вычислительной эффективности моделей, в частности, с использованием методов искусственного интеллекта [5].

3. Постановка граничных условий скольжения с учетом сложной поуровневой кинетики в газовой фазе и реакций рекомбинации/деактивации на поверхности [6]. На примере течения воздуха вдоль линии торможения будет оценено влияние различных моделей граничных условий на температуру, состав смеси и тепловые потоки.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, проект 23-19-00241.



Коэффициент затухания в CO₂ [4]

1. Нагнибеда Е.А., Кустова Е.В. Кинетическая теория процессов переноса и релаксации в потоках неравновесных реагирующих газов. Санкт-Петербург, Изд-во С.-Петерб. ун-та (2003).

2. Мандельштам Л.И., Леонтович М.А. К теории поглощения звука в жидкостях // Журн. эксп. и техн. физ. 1937. Т. 7. № 2. С. 438–449.

3. Tisza L. Supersonic absorption and Stokes viscosity relation // Phys. Rev. 1942. Т. 61. С. 531–536.

4. Kustova E., Mekhonoshina M., Bechina A., Lagutin S., Voroshilova Y. Continuum Models for Bulk Viscosity and Relaxation in Polyatomic Gases // Fluids. 2023. Т. 8. 48.

5. Kosareva A., Kunova O., Kustova E., Nagnibeda E. Hybrid approach to accurate modeling of coupled vibrational-chemical kinetics in carbon dioxide // Phys. Fluids. 2022. Т. 34. 026105.

6. Shakurova L., Kustova E. State-specific boundary conditions for nonequilibrium gas flows in slip regime // Phys. Rev. E. 2022. Т. 105. 034126.

SMART-МАТЕРИАЛЫ: НОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ МЕХАНИКИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ

Матвеев В.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь
e-mail: mvp@icmm.ru

Smart-материалы подобно материалам биологических объектов должны функционально изменять свои свойства в зависимости от состояния окружающей среды. В общем случае они представляют собой композитные структуры, включающие сенсорные элементы, исполнительные элементы и элементы обработки информации.

В настоящей работе в качестве актуаторов рассматриваются пьезоэлектрические материалы и материалы с памятью формы, а в качестве сенсоров — пьезоэлектрические и оптоволоконные датчики. С точки зрения функциональных задач, решаемых с использованием актуаторов, рассматриваются задачи управления геометрией конструкций и задачи управления динамическими характеристиками. При использовании smart-материалов с сенсорами рассматриваются задачи регистрации характеристик деформационного поведения конструкции.

Для smart-материалов на основе пьезоэлементов разработаны математические постановки задач о квазистатическом деформировании, собственных и вынужденных установившихся колебаниях конструкций. При наличии электродированных поверхностей у пьезоэлементов к ним могут быть подключены электрические цепи различной архитектуры, состоящие из резисторов, ёмкостей и индуктивностей. Эти элементы, являясь в механических процессах электрическими аналогами вязкости, упругости, массы, расширяют спектр параметров, влияющих на динамические процессы. В рассматриваемые системы могут быть включены элементы из графеновых композитов, которые при наличии электродированных поверхностей могут играть роль резисторов, реализуя дополнительный диссипативный механизм. Разработанные методы апробированы на модельных задачах [1,2].

Для smart-материалов на основе материалов с памятью формы, разработаны методы и алгоритмы для расчёта формоизменения элементов конструкций за счёт использования одномерных элементов из материалов с памятью формы, встроенных в материал или фиксируемых на поверхности объекта.

На основе моделирования проанализирована возможность изменения спектра собственных частот колебаний при локальных механических воздействиях, вызывающих дополнительные напряжения и деформации. Эти воздействия могут быть результатом реализации эффекта памяти формы или пьезоэлектрического эффекта.

Для smart-систем, наделённых сенсорами, получены теоретические и экспериментальные результаты, обеспечивающие обоснованное использование волоконно-оптических датчиков деформаций, встраиваемых в материал или фиксируемых на его поверхности [3,4].

Тезисы подготовлены в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

1. Matveenko V.P., Iurlova N.A., Oshmarin D.A. Damping of vibrations of smart-systems incorporating piezoelectric elements and shunt circuits with parameters derived from the models of continuum and discrete mechanics // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023. DOI: 10.1080/15376494.2023.2241134.

2. Матвеев В.П., Ошмарин Д.А., Юрлова Н.А. Об использовании электропроводящих композиционных материалов для дополнительного демпфирования smart-систем на основе пьезоэлементов // *Прикладная механика и техническая физика*, 2021, т.62, №5. – с. 45-57. DOI: 10.15372/PMTF20210505.

3. Matveenko V., Serovaev G., Kosheleva N., Fedorov A. Numerical and experimental analysis of the reliability of strain measured by surface-mounted fiber-optic sensors based on Bragg gratings // *Struct Control Health Monit*. 2022. art.no. e3142. DOI: 10.1002/stc.3142.

4. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. Measurement of Gradient Strain Fields with Fiber-Optic Sensors // *Sensors*. 2023. V. 23. № 410. P. 1-12. DOI: 10.3390/s23010410.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Никитин Н.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: nvnikitin@mail.ru

Движение жидкости и газа в окружающей природе, а также в большом числе технических устройств происходит при больших скоростях, при которых реализуется турбулентный режим течения. Турбулентность характеризуется наличием случайных во времени и в пространстве пульсаций гидродинамических параметров, большим разбросом динамически важных масштабов вовлеченных в движение вихрей. Переход к турбулентности сопровождается как правило кардинальным изменением основных характеристик потока. Например, при течении вдоль твердой поверхности происходит многократное повышение сопротивления трения. Поиск методов описания, предсказания и прогнозирования свойств турбулентных течений активно ведется во многих странах.

Серьезный импульс исследование турбулентности получило с появлением мощных компьютеров и, в частности, многопроцессорных вычислительных систем. Появилась возможность численного моделирования турбулентных течений на основе решения основных уравнений движения вязкой жидкости – уравнений Навье-Стокса. Если в конце 20 века основным в численных расчетах было доказательство пригодности детерминированной системы уравнений Навье-Стокса для описания стохастических турбулентных процессов, то в наши дни, прямое численное моделирование заслужило статус равноправного и надежного инструмента исследования турбулентности и все шире применяется для расчета конкретных течений, а главное для изучения фундаментальных свойств турбулентности, недоступных для исследования более традиционными экспериментальными методами.

В докладе будут представлены результаты, демонстрирующие технологию и точность прямого численного моделирования (DNS) турбулентных течений.

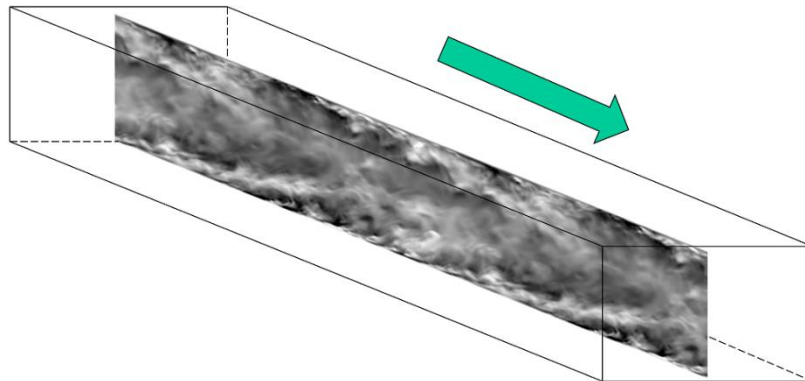


Рис.1 Визуализация численного расчёта турбулентного течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-21-00184 с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

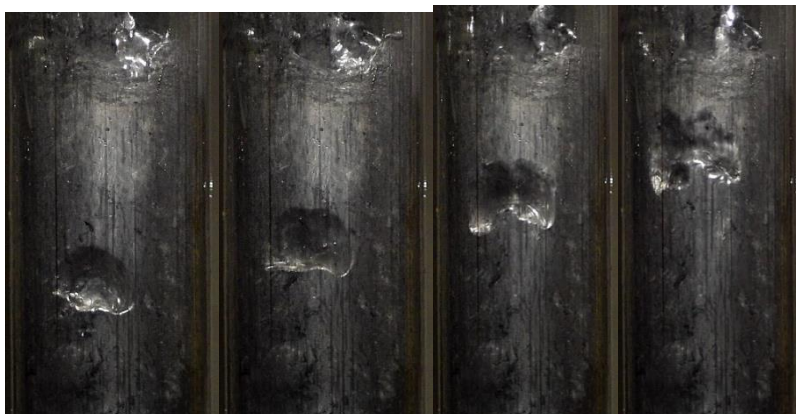
ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д.

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
e-mail: pribaturin@itp.nsc.ru

В отличие от хорошо изученных двухфазных течений воды и газа, газожидкостным течениям в жидких металлах ранее уделялось мало внимания. Для жидких металлов исследование процессов диспергирования газовой фазы производилось для процессов очистки металлов и сплавов, а также непрерывной выплавки стали. В связи с развитием реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями роль исследований совместного течения жидкого металла и газа существенно увеличилась. Большая разность плотностей между газом и жидким металлом создает большую плавучесть, действующую на газовую фазу и, соответственно, может повлиять на форму, размер и эволюцию пузырьков, движущихся в жидком металле, структуру и режимы газожидкостного течения. Для того, чтобы правильно уметь предсказывать поведение такой двухфазной среды, необходимо понять применимость существующих в настоящее время моделей двухфазного течения для описания поведения газовой фазы в жидком металле. Такое понимание, прежде всего, идет от постановки и проведения соответствующих экспериментальных исследований, результаты которых можно напрямую сравнивать с известными данными по течениям газа и жидкости с «нормальным» соотношением плотности фаз.

В докладе обсуждаются постановки экспериментов и полученные результаты экспериментальных исследований структуры и режимов течения двухфазной среды, состоящей из жидкого металла и газовой фазы. Приводятся оригинальные методики измерений размера, частоты отрыва, отрывного диаметра пузырей инертного газа в расплавленном металле, газосодержания, скорости движения газовой фазы, визуализации двухфазного течения, позволившей зафиксировать подробную эволюцию пузырей в жидком металле.



Пример движения газового пузыря в жидком свинце, температура 450°C, диаметр канала 30 мм.

В докладе также приводятся полученные экспериментальные данные по количественным параметрам, характеризующим поведение газа, в том числе по структуре и режимам газожидкостного течения в жидком металле. Данные некоторых измерений обобщены на основе критериев чисел Рейнольдса, Этвеша и Мортонна.

Данные измерений существенно расширяют валидационную базу вычислительных кодов и используются для уточнения расчетных моделей газожидкостного течения в жидком металле.

1. Mosunova, N.A., Alipchenkov, V.M., Pribaturin, N.A., Strizhov, V.F., Usov, E.V., Lobanov, P.D., Afremov, D.A., Semchenkov, A.A., Larin, I.A., Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results // Nuclear Engineering and Design. 2020. T. 359. C. 110463.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Широбоков М.Г.¹, Корнеев К.Р.¹, Перенухов Д.Г.¹

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

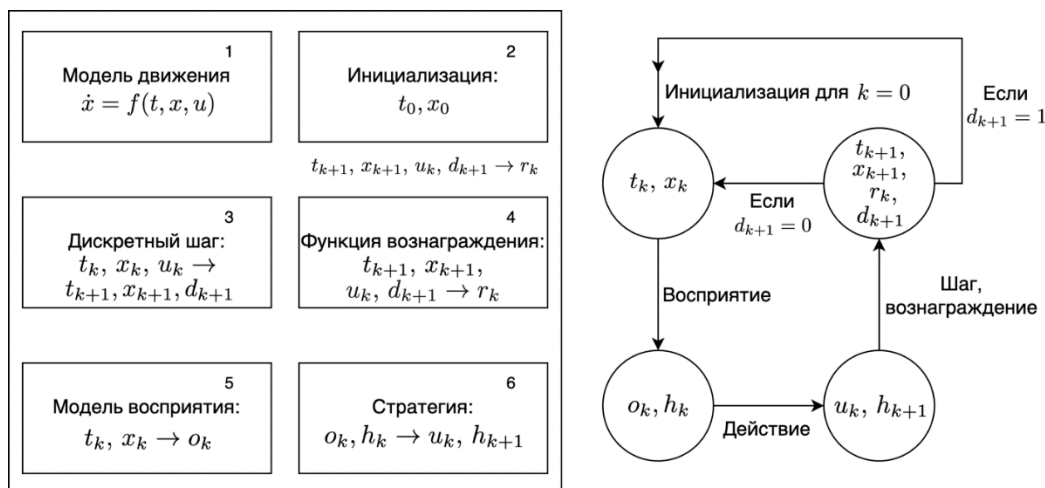
e-mail: shirobokov@keldysh.ru

В настоящее время одними из самых актуальных задач управляемого движения космическими аппаратами являются безопасная посадка на неровную поверхность небесного тела, поддержание движения космического аппарата в окрестности малого небесного тела с плохо изученным гравитационным полем, управление движением аппарата на малых высотах в окрестности малых небесных тел, управление угловым движением с ограничениями на управляющие воздействия, управление движением в быстроменяющихся внешних условиях, управление связанным орбитальным и угловым движением аппарата в сложных динамических средах, управление движением с целью понижения риска столкновения с опасными и маневрирующими космическими объектами. Все эти задачи сложны и характеризуются наличием неопределенности в состоянии аппарата, его характеристик и характеристик окружающей среды.

В последние несколько лет часть теории оптимальности Беллмана, называемая машинным обучением с подкреплением, пополнилась эффективными алгоритмами, широко зарекомендовавшими себя в большом числе областей, в том числе и в механике. Эти методы основываются на алгоритмах приближенного динамического программирования, методах оптимизации функций с большим числом параметров и теории частично наблюдаемых марковских процессов принятия решений. Преимуществом этих методов является существенное сокращение математических предположений и значительный охват возможных решаемых задач. Многочисленные примеры их применения показывают, что стратегии управления, создаваемые этими методами, способны адаптироваться к неизвестным или меняющимся параметрам аппарата и внешней среды [1]. Авторский обзор применения этих методов к задачам управления космическими аппаратами выявил общую методологию в построении подобных стратегий.

В докладе представлена общая методология сведения задачи оптимального управления механическими системами к задаче машинного обучения с подкреплением и программная архитектура для численного решения задач. Приводятся примеры постановок и решения задач в рамках указанной методологии в области механики космического полета. В частности, рассмотрена задача управления космическим аппаратом в окрестности фокуса гравитационной линзы Солнца на расстоянии более 550 а.е. от Солнца с целью наблюдения экзопланет в высоком разрешении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-71-00051).



Программные элементы (слева) и этапы (справа) машинного обучения с подкреплением.

1. Shirobokov M., Trofimov S., Ovchinnikov M. Survey of Machine Learning Techniques in Spacecraft Control Design // Acta Astronautica, 2021. Vol. 186, pp. 87–97. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.05.018>.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА НА СПОСОБНОСТЬ К ДЕГРАДАЦИИ СМЕСЕЙ ПОЛИМЕРОВ

Абушахманова З.Р.^{1,2}, Масталыгина Е.Е.^{1,2}, Пантюхов П.В.^{1,2}, Попов А.А.^{1,2}

¹ Научная лаборатория «Перспективные композиционные материалы и технологии», Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Россия, г. Москва

² Лаборатория физико-химии синтетических и природных полимеров, Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Россия, г. Москва

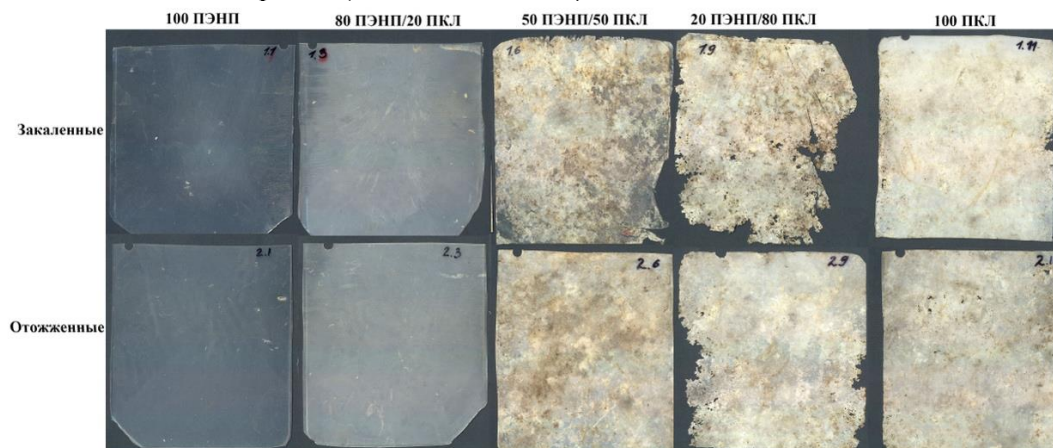
e-mail: Abushahmanova.ZR@rea.ru

Кристаллическая фаза играет решающую роль в определении свойств полимерного композита. Кристаллизация по определению является термодинамическим процессом, который в основном зависит от скорости охлаждения на последней стадии производственного цикла. Быстрое охлаждение, безусловно, выгодно производителям композитов, поскольку общее время обработки может быть сокращено. Однако важно понимать, как скорость охлаждения влияет на механические свойства получаемого композита. При высокой скорости охлаждения (закалка) образуются мелкокристаллические структуры и эти материалы обладают большей эластичностью и высоким удлинением, а при медленном охлаждении расплава (отжиг) образуются крупнокристаллические структуры, которые образуются в дефектных областях макромолекул и изделия, полученные таким способом, обладают большей жесткостью [1].

Объектами исследования являлись полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) и биоразлагаемый полимер поликапролактон (ПКЛ) в широком диапазоне составов. В данной работе были рассмотрены влияние способов охлаждения пленок, полученных методом горячего прессования, на формирование надмолекулярной структуры композитов. Смесии ПЭНП с ПКЛ получали смешиванием на лабораторных смесительных вальцах, далее полученные смеси разрезали на куски, которые затем измельчали на роторно-ножевой мельнице, далее прессовали пленки на гидравлическом прессе с нагревом на алюминиевых пресс-формах с целлофановой подложкой. Для получения различных надмолекулярных структур охлаждение плёнок проводили двумя широко применяемыми методами, такими как водяное охлаждение (закалка) и естественное воздушное охлаждение под гнетом (отжиг). В результате прессования получили пленки толщиной 150 – 300 мкм.

Образовавшаяся фазовая структура образцов при разной скорости охлаждения оказала значительное влияние на способность пленок к биоразложению под действием почвенных микроорганизмов в грунте в течение 6 месяцев экспонирования. Было показано, что пленки содержанием 20 мас.% ПКЛ практически не разрушились в обоих случаях. Для смесей с содержанием 50 и 80 мас.% ПКЛ было выявлено наибольшая подверженность к разрушению и снижение массы образцов более чем на 25% у закаленных и от 10 до 13% для отожженных образцов. В случае с чистым ПКЛ в обоих случаях наблюдается потеря массы 10%. Пленки, полученные путем закалки, подверглись более интенсивному разрушению, в том числе под действием микробиоты, вследствие меньшей упорядоченности структуры.

Абушахманова З.Р. и Масталыгина Е.Е. выражают благодарность финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-3573.2022.1.3).



Фотографии пленок, полученных закалкой и отжигом, после 6 месяцев экспонирования в грунте.

ПРИЕМИСТОСТЬ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ ОТЛОЖЕНИИ СОЛИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ

Афанасьев А.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Размещение углекислого газа (CO_2) в водонасыщенных пластах сегодня считается эффективным способом снижения воздействия человека на окружающую среду [1]. Однако, отложение солей в призабойной зоне скважин, использующихся для закачки CO_2 в пласт, может приводить к негативным последствиям: значительному снижению приемистости скважин, т.е. уменьшению максимального расхода газа.

В рамках моделирования фильтрации смеси $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O--NaCl}$ в докладе приводятся результаты исследования решений автомодельной задачи Римана, описывающей осесимметричное течение газа от скважины (Рис.). Предложен графический способ построения точного решения этой задачи. Показано, что решение содержит две свободных границы – сильных разрыва S_σ и S_β , присоединенных с двух противоположных сторон к волне Римана R [2]. Оба разрыва являются фронтами Жуге, т.е. они перемещаются с характеристической скоростью. Передний разрыв S_β характеризует максимальное расстояние, на которое газ распространился от скважины, а задний разрыв S_σ ограничивает область, где при испарении воды в поровом пространстве отлагается соль. Данная область является скин зоной, т.е. зоной пониженной проницаемости пласта. С использованием построенного решения задачи Римана выводится удобное соотношение для скин-фактора – безразмерного критерия подобия, характеризующего гидравлические потери давления при фильтрации через скин зону. Показано, что на скин-фактор наиболее сильно влияют соленость пластовой воды и ее относительная фазовая проницаемость.

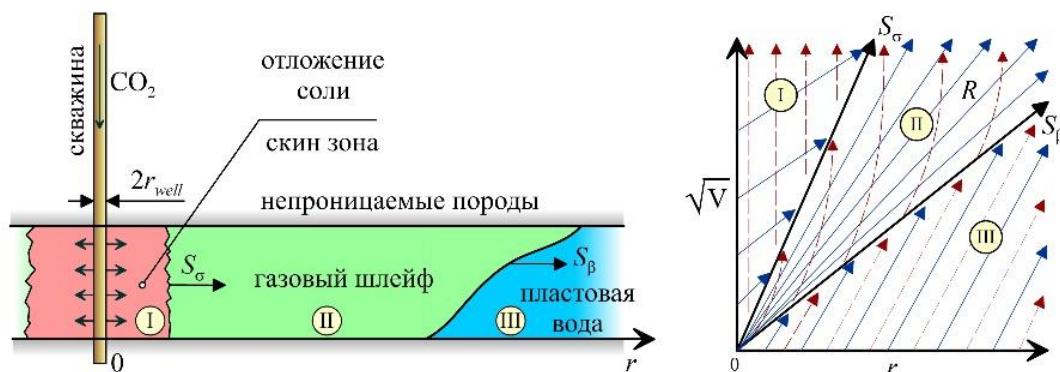


Рис. Схема осесимметричной фильтрации CO_2 от скважины (слева) и соответствующая волновая картина (справа). Сплошные и разрывные линии показывают характеристические линии двух различных типов. Здесь r – расстояние до скважины, а V – объем закачанного газа.

Полученная формула для скин фактора может использоваться для быстрой оценки приемистости скважины и при численном моделировании закачки CO_2 .

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-71-10051.

1. Afanasyev A., Penigin A., Dymochkina M., Vedeneeva E., Grechko S., Tsvetkova Yu., Mikheev I., Pavlov V., Boronin S., Belovus P., Osipov A. Reservoir simulation of the CO_2 storage potential for the depositional environments of West Siberia // 2023 Gas Sci. Eng. 114, 204980. doi: 10.1016/j.jgsce.2023.204980.

2. Afanasyev A., Grechko S. Analytical expression for the skin factor of the salt deposition zone around a CO_2 injection well: Extension to the case of ternary miscible displacement // 2023 Geoenergy Sci. Eng. In press.

ЗАКОНЫ ДЕФЕКТА СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

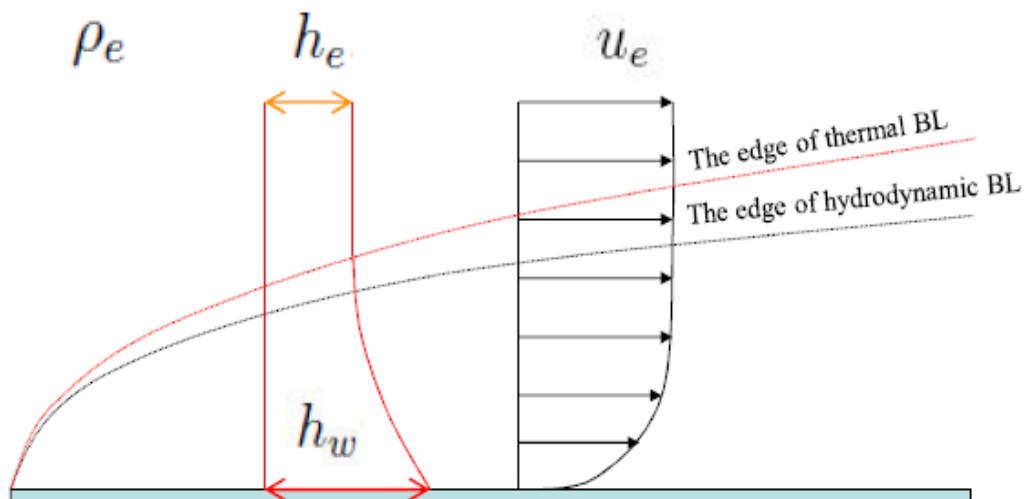
Агеев А.И., Вигдорович И.И., Манаенкова Т.А.

НИИ механики МГУ, Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва
e-mail: vigdorovich.igor@gmail.com aaiageev@mail.ru

Рассматривается сверхзвуковой турбулентный пограничный слой на пластине при нулевом продольном градиенте давления. Разработана рациональная асимптотическая теория, главными элементами которой являются условия замыкания, связывающие турбулентное касательное напряжение и турбулентный поток тепла с градиентами усредненной скорости и энтальпии, и решение уравнений Рейнольдса для сжимаемого газа в трех характерных областях течения (вязкий подслой, логарифмический подслой, внешняя область пограничного слоя) с последующим асимптотическим сращиванием. Теория не предполагает использования каких-либо частных гипотез о характере турбулентного обмена и фактически основывается только на первых принципах.

Рассмотрена внешняя область пограничного слоя при умеренных сверхзвуковых числах Маха набегающего потока. В результате сращивания решений для внешней области и логарифмического подслоя получены законы дефекта скорости и температуры, позволяющие описать профили этих величин универсальными кривыми, известными для пограничного слоя несжимаемой жидкости.

Работа выполнена при поддержке РНФ (№ 22-21-00315).



1. Вигдорович И.И. Тепловой турбулентный пограничный слой на пластине. Аналогия Рейнольдса и закон теплопередачи во всем диапазоне числа Прандтля // Известия РАН. МЖГ. 2017. № 5. С. 38–52.
2. Вигдорович И.И., Агеев А.И., Манаенкова Т.А.. Связь между скоростью и температурой в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2022. Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2022 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2022. – 174 с. – (Электронное издание сетевого распространения).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРКОНЦЕНТРАЦИИ АНАЛИТА В МИКРОУСТРОЙСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Алексеев М.С.^{1,2}, Ганченко Г.С.¹, Шелистов В.С.¹, Демехин Е.А.^{1,3}

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва

²Кубанский государственный университет, г. Краснодар

³Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Одной из важных практических задач микрофлюидики является проектирование лабораторий на чипах для проведения медицинских анализов [1]. При создании подобных микроустройств практически всегда стоит проблема предварительного концентрирования аналита в буферном растворе [2].

В докладе будут представлены результаты численного моделирования микроустройства позволяющего осуществлять концентрирование аналита из раствора бинарного электролита за счет внешнего электрического поля. Работа устройства основана на использовании ионоselectивной микрочастицы (рис. слева). Концентрирование аналита происходит за счёт асимметрии в коэффициентах диффузии и зарядовых числах между макромолекулами аналита и иона солей буферного раствора. Данное устройство также может работать как микромиксер [3], а также для концентрирования ионов солей [4], что было продемонстрировано экспериментально [5].

В результате численного моделирования были обнаружены два типа концентрирования аналита: концентрирование внутри вихря Духина-Мишук (рис. справа (а)) и суперконцентрирование в области концентрационной струи (рис. справа (а)). Каждый из этих механизмов возникает в зависимости от отношения произведений зарядового числа и коэффициента диффузия аналита и ионов соли.

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ № 22-79-10085.

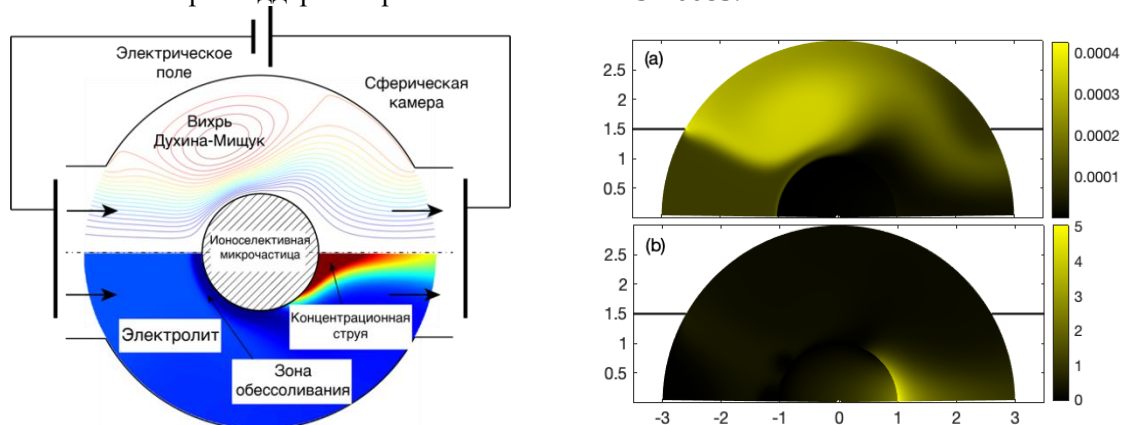


Рис. (слева) Схематичное изображение устройства. Снизу цветов выделена концентрация соли, снизу – линии тока. Постановка осесимметричная.

(справа) Плотность концентрации аналита при концентрировании в вихре (а) и в струе (б), начальная безразмерная концентрация аналита 0.0001.

1. Kumar S. [и др.]. Quantifying PON1 on HDL with nanoparticle-gated electrokinetic membrane sensor for accurate cardiovascular risk assessment // *Nature Communications*. 2023. № 1 (14). С. 557.
2. McCarthy K. P. [и др.]. An integrated ion-exchange membrane-based microfluidic device for irreversible dissociation and quantification of miRNA from ribonucleoproteins // *Lab on a Chip*. 2022. № 2 (23). С. 285–294.
3. Shiffbauer J., Ganchenko G., Nikitin N., Alekseev M., Demekhin E. Novel electroosmotic micromixer configuration based on ion-selective microsphere // *Electrophoresis*, 2021. V. 42, P.2511-2518.
4. Ganchenko G. S., Alekseev M. S., Demekhin E. A. Gravitation effect on concentration of ions near ion-selective microparticle // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2023. № 5 (27). С. 32.
5. Ganchenko G. S. [и др.]. Electrokinetic and Electroconvective Effects in Ternary Electrolyte Near Ion-Selective Microsphere // *Membranes*. 2023. № 5 (13).

УПРАВЛЕНИЕ ТРЕНИЕМ ЖИДКОСТИ ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ ГИДРОФОБНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Амелюшкин И.А.^{1,2}, Кудров М.А.¹, Кулешов П.С.¹, Морозов А.О.¹

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

²Центральный ИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Проведены аналитические исследования особенностей нанесения рельефа на поверхность металла с помощью лазерной абляции. Предложен способ управления пространственным периодом рельефа путем изменения параметров лазерной системы. На основе опубликованных экспериментальных данных по лазерной абляции показана возможность удовлетворения условиям супергидрофобности модифицированных поверхностей из алюминия, титана и стали. Получены аналитические выражения для коэффициентов трения и отношения расходов жидкости в плоских, цилиндрических каналах с рельефом и без, а также для момента сил сопротивления при вращении соосных цилиндров в зависимости от толщины слоя воздушной смазки и геометрических параметров рельефа поверхности.

При движении жидкости по поверхности тела, в порах которого есть воздух, могут реализоваться 7 режимов (рис. 1, слева). Режимы 6 и 7 неустойчивы и могут быть реализованы при большой разнице температур твердого тела и жидкости, приводящей к испарению жидкости и образованием газового слоя, который снижает теплообмен жидкости с поверхностью и приводит к малому сопротивлению. При этом в случае ступенчатого и направленного в одну сторону рельефа возможно движение капель по горизонтальной поверхности за счет разницы давлений у границ капель. При движении жидкости по такой поверхности за счет касательных напряжений на межфазной границе газ будет приводиться в движение и, как следствие, толщина воздушного слоя будет уменьшаться, поскольку поступление воздуха из окружающей среды в поры рельефного тела, по которому движется жидкость, ничтожно мало. Величина этого потока по отношению к расходу вымываемого слоя газа ничтожно мала из-за воздействия сил поверхностного натяжения, которые препятствуют попаданию воздуха в поры покрытия. Таким образом, с течением времени указанные на рис. 1 режимы будут меняться и стремиться к состоянию, в котором воздух будет удерживаться в нижней части пор рельефного тела за счет сил поверхностного натяжения. В отличие от пленочного течения или сплошного потока жидкости при движении капель будут иметь место режимы 3–7 в силу малого времени касательного воздействия жидкости на воздух, находящийся в порах покрытия. В случае плотного потока капель, при котором формируется тонкая пленка и ручейки, длина скольжения может быть значительно ниже, чем в режиме, когда по поверхности движутся отдельные капли.

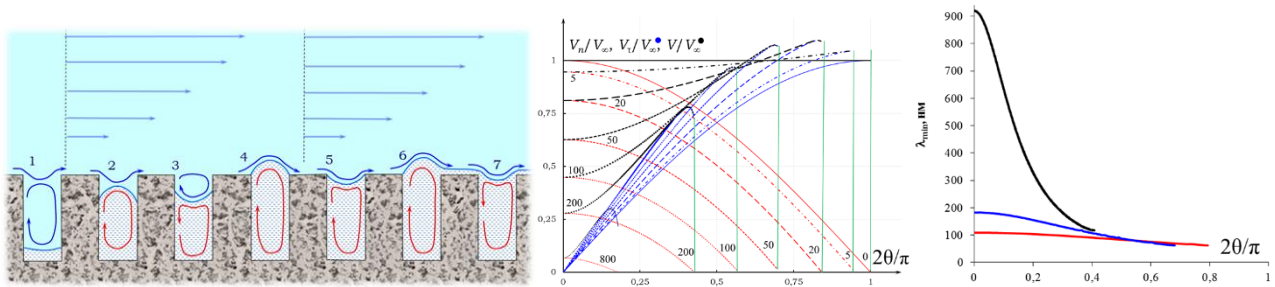


Рис. 1, слева – схема режимов движения жидкости по пластине, в порах которой находится воздух. В центре структура поля скоростей (линии: черная – U , синяя – U_τ , красная – U_n) в момент удара капли воды $R = 20$ мкм из набегающего потока $U_\infty = 100$ м/с в зависимости от угла места удара капли θ при различных радиусах обтекаемого цилиндрического тела (мм); справа – соответствующая область допустимых значений периода рельефа λ , ограниченных сверху, при различных радиусах R_0 обтекаемого тела (линии: черная – 200 мм, синяя – 100 мм, красная – 50 мм).

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 20411.1770290019 18.004 на НИР «Флагман 1».

1. Амелюшкин И.А. Критерии подобия и особенности обледенения тел в потоках воздуха, содержащего переохлажденные капли // Ученые записки ЦАГИ, № 3, 2023.

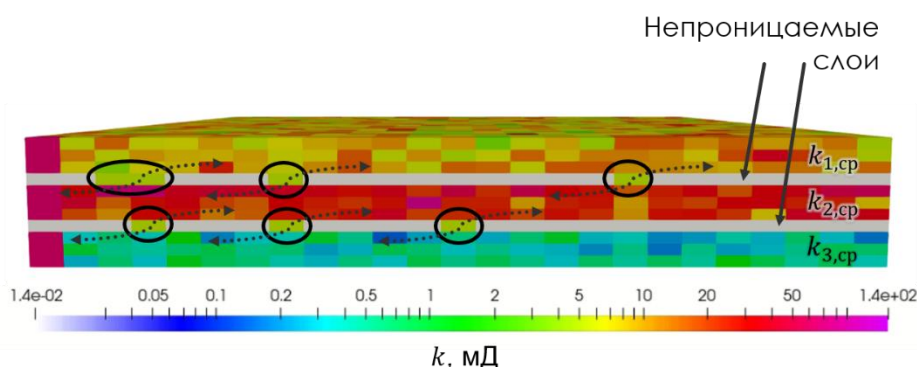
ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

Андреева А.И.¹, Афанасьев А.А.¹

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: waandreeva@gmail.com

Одной из актуальных задач недропользования является задача повышения нефтеотдачи пластов. Одним из методов является закачка воды и/или газа в пласты. Вода, действуя как поршень, способствует движению нефти к добывающим скважинам. Газ может растворяться в нефти, снижая ее вязкость и увеличивая ее объем. Одним из хорошо растворяющихся в нефти газов является углекислый газ (CO_2) [1,2], который также является парниковым газом. Выбросы парниковых газов в атмосферу представляют актуальную проблему в области экологии и глобального потепления. Поэтому закачка углекислого газа может являться одной из мер по декарбонизации, а также способствовать увеличению нефтеотдачи. Необходимо определять, какие режимы водогазового воздействия на нефтяные пласты являются оптимальными.

На оптимальные режимы водогазового воздействия могут влиять многие факторы, такие как состав пластовой нефти и неоднородное распределение пористости и проницаемости пласта. Добыча тяжелой нефти является более трудоемким процессом, а низкопроницаемые включения могут мешать движению жидкости или газа. Цель данного исследования заключается в том, чтобы понять, как неоднородное распределение пористости и проницаемости влияет на эффективность водогазового воздействия. В данной работе рассматривается трехмерная модель пласта, насыщенного нефтью, с неоднородным распределением пористости и проницаемости (рис.1). Пласт состоит из проницаемых и непроницаемых слоев. Непроницаемые слои содержат проницаемые включения, через которые может осуществляться переток между проницаемыми слоями. Газ, как более легкая фаза, стремится подняться к кровле пласта, а вода, как более тяжелая фаза, стремится к подошве пласта. Таким образом остаются области, не охваченные вытеснением. В рамках гидродинамического моделирования показано, что непроницаемые слои препятствуют гравитационному расслоению фаз, так как течение происходит преимущественно в тонких проницаемых пропластках. При большем числе непроницаемых слоев происходит более полное вытеснение нефти. Однако, так как средняя проницаемость каждого пропластка может быть различна, то при движении по высокопроницаемому пропластку вода и газ могут быстро прорваться к добывающей скважине. Показано, что водогазовое воздействие наиболее эффективно на пластах, состоящих из большого числа тонких проницаемых прослоек, среднеквадратичное отклонение проницаемости которых мало.



Пласт состоит из трех проницаемых пропластков, средняя проницаемость которых $k_{1,cp}$, $k_{2,cp}$, $k_{3,cp}$, соответственно. Черными кружками выделены каналы, через которые может осуществляться переток.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-71-10051-П.

1. Afanasyev A., Andreeva A., Chernova A. Numerical optimisation of CO_2 flooding using a hierarchy of reservoir models // *Advances in Geosciences*. — 2021. — Vol. 56. — P. 19–31.
2. Afanasyev A., Andreeva A., Chernova A. Influence of oil field production life on optimal CO_2 flooding strategies: Insight from the microscopic displacement efficiency // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 205. — P. 108803.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Безверхий Д.С.¹, Кондратьев Н.С.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: bezverkhys@yandex.ru

В настоящее время одним из фундаментальных процессов при термомеханической обработке металлов и сплавов является рекристаллизация. Рекристаллизация приводит к изменению внутренней структуры материалов, что впоследствии влияет на их прочностные свойства [1]. В данной работе рассматривается динамическая рекристаллизация, которая протекает в поликристаллах при повышенных и высоких температурах неупругого деформирования и существенно зависит от термомеханических воздействий [1].

Для описания циклов рекристаллизации применяется подход, предложенный M.J. Luton и C.M. Sellars [2], в котором объемная доля рекристаллизованного материала определяется с помощью соотношения Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov. Управляющими параметрами модели являются: критическая деформация ε_c , при достижении которой начинается рекристаллизация, и деформация ε_x , при достижении которой будет рекристаллизовано 98% материала. Для описания неупругого отклика материала в данной работе применяется двухуровневая статистическая модель [3]. Генерируется выборка зерен с различной кристаллографической ориентацией, на уровне отдельного зерна рассматривается движение краевых дислокаций по системам скольжения, как основной механизм релаксации упругих напряжений. На макроуровне в результате операции осреднения определяется отклик всего поликристалла. В данной работе предлагается связь двухуровневой статистической модели [3] и модели M.J. Luton и C.M. Sellars [2].

Σ_u , МПа

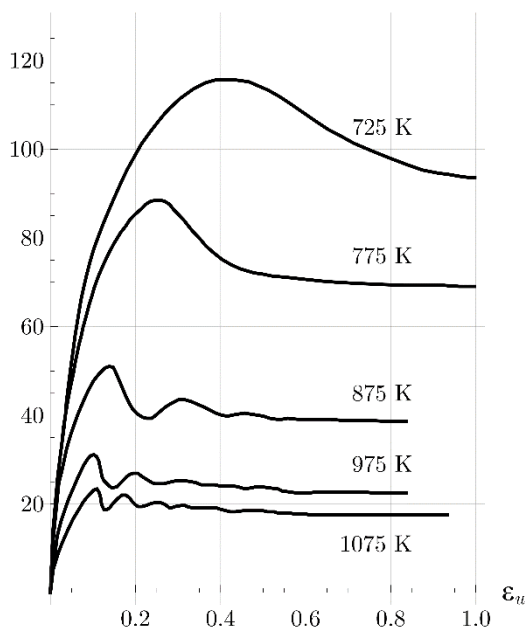


Рис. 1. Оцифрованные экспериментальные данные из работы [4]

Разработанная математическая модель идентифицируется на основе диаграмм нагружения, полученных в серии экспериментов на одноосное сжатие поликристалла меди при скорости деформирования $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне температур 725-1075 K [4] (Рис. 1). С помощью идентификации модели были определены: начальные критические напряжения τ_{c0} , параметры упрочнения h_0 , τ_{sat} , a и критическая деформация ε_c . В результате была разработана математическая модель, позволяющая удовлетворительно описать процесс неупругого деформирования с учетом динамической рекристаллизации при различных температурах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).

1. Humphreys J., Rohrer G.S., Rollett A. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. – Oxford: Elsevier, 2017.
2. Luton M.J., Sellars C.M. Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation // Acta Metall. 1969. Vol. 17. P. 1033-1043.
3. Трусцов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно-поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: СО РАН, 2019.
4. Blaz L., Sakai T., Jonas J.J. Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of copper // Metal Science. 1983. Vol. 17. P. 609-616.

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЕВ ТКАНИ В ВОЛОКНИСТОМ ТКАНЕВОМ КОМПОЗИТЕ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

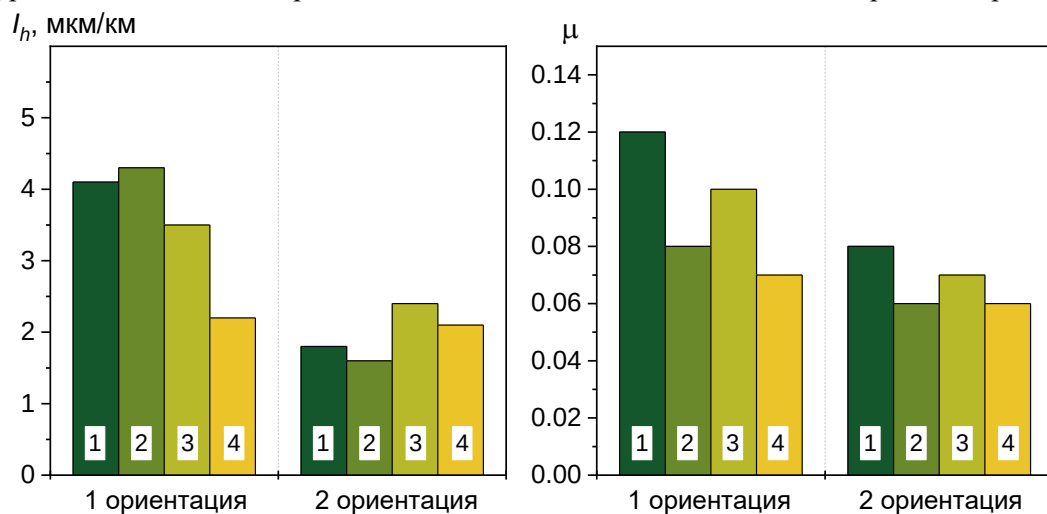
Буковский П.О.¹, Щербакова О.О.¹, Муравьева Т.И.¹, Шпенев А.Г.¹

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

e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

В данной работе экспериментально определяются трибологические свойства (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) тканевых углерод-углеродных композитных материалов при фрикционном взаимодействии с твердым контртелом. Объектами исследований являлись четыре углерод-углеродных композита серии «Хардкарб», произведенные ООО «ГМК» г. Таганрог. Данные композиты отличались как типом армирующей углеродной ткани, материалом прекурсора, так и температурой отжига. Для оценки влияния ориентации слоев ткани на трибологические свойства композиты были изготовлены в двух вариациях расположения ткани к поверхности трения: перпендикулярно и параллельно. В качестве контртела использовалась спеченная керамика из карбида кремния, данный материал отличается высокой твердостью ($HRC \approx 92,5 \pm 1,5$) и практически не изнашивается в процессе испытаний.

Экспериментальное изучение трибологических свойств композитов осуществляли на лабораторном трибометре УМТ-2 по схеме контакта кольцо-диск. Описание трибометра и схемы испытания приведено в [1]. Испытания проводили при фиксированной нагрузке $F = 150$ Н и скорости скольжения $V = 1,25$ м/с (для композитов с перпендикулярным расположением ткани) и $V = 0,5$ м/с (с параллельными слоями). На рисунке приведены результаты трибологических испытаний образцов тканевых композитов, которые демонстрируют влияние на значения интенсивности изнашивания I_h (слева) и коэффициента трения μ (справа) следующих факторов: типа армирующей углеродной ткани; температуры отжига композита; расположения слоев ткани относительно поверхности трения.



Зависимость интенсивности изнашивания I_h [мкм/км] (слева) и коэффициента трения μ (справа) исследуемых композитов 1,2,3,4 при двух ориентациях слоев ткани относительно поверхности трения.

Показано, что при испытании образцов с параллельным расположением слоев ткани происходит снижение интенсивности изнашивания, причем для некоторых композитов (первый и второй) снижение происходит в 2 раза с $I_h \approx 4$ мкм/км до $I_h \approx 2$ мкм/км по сравнению с композитами с перпендикулярным расположением слоев ткани. По значению коэффициента трения все композиты с параллельной ориентацией слоев ткани имеют меньшие $\mu = 0,06 \dots 0,08$ показатели в сравнении с образцами с перпендикулярным армированием.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант №19-19-00548-П). Авторы выражают благодарность ООО «ГМК», г. Таганрог, за предоставленные образцы композитных материалов и ИФФТ РАН им. Ю.А. Осипьяна за предоставленные образцы высокопрочной керамики.

1. Буковский П.О., Морозов А.В., Кулаков В.В., Голубков А.К., Родионов Н.Б., Кириченко А.Н. Триботехнические свойства углерод-углеродных фрикционных композитов при высоких температурах // Трение и износ. 2022. Т. 43. № 5. С. 491-501.

ВЛИЯНИЕ ГЕМИНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОФОРМОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3- ГИДРОКСИБУТИРАТА

Варьян И.А.^{1,2}, Тюбаева П.М.¹, Попов А.А.^{1,2}

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

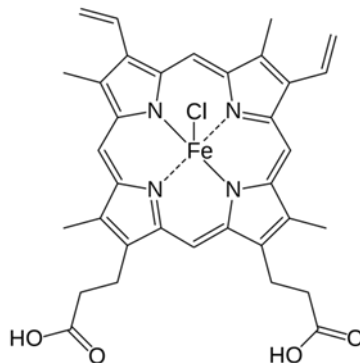
²Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва

e-mail: ivetta.varyan@yandex.ru

Интерес к материалам из возобновляемых источников для создания инновационных биомедицинских материалов быстро растет [1]. Большое внимание уделяется биополимерам, например, полигидроксиалканоятам (ПГА), которые представляют собой класс устойчивых алифатических полиэфиров, продуцируемых различными микроорганизмами [2]. Поли(3-гидроксибутират) (ПГБ) стал самым распространенным биополимером благодаря большому количеству преимуществ. ПГБ является биоразлагаемым, биосовместимым и термопластичным полимером [3]. Частицы ПГБ могут быть извлечены из микроорганизмов, которые синтезируют, накапливают и способны разлагать этот полимер в качестве естественного источника энергии. Продукты распада ПГБ нетоксичны. Более того, ПГБ способен разлагаться за короткий период. Композиты на основе ПГБ становятся популярными в биомедицинском применении благодаря высокой биосовместимости. Биомедицинские материалы на основе ПГБ с большой площадью поверхности, включая высокопористые пленки и волокнистые материалы, обладают высокой схожестью со структурами и поверхностями живых организмов и способствуют клеточной адгезии, проходимости, миграции и росту. ПГБ также показал высокую эффективность при разработке новых материалов для заживления ран.

Однако промышленное и коммерческое применение материалов на основе ПГБ ограничено из-за плохих механических свойств - низкой прочности при растяжении и относительном удлинении. Тем не менее, многие коллективы разработали эффективные методы модификации ПГБ. Особую эффективность продемонстрировали различные нанокompозиты на основе ПГБ и биополимеров или добавок природного происхождения: поли(этиленгликоль), полилактид, поли-капролактон, хитозан, наночастицы, катализаторы и ферменты, биоактивные молекулы.

Особый интерес исследователи проявляют к природным порфиринам, среди которых гемин. На рисунке показана структурная формула гемина.



В данной работе мы разработали композиты ПГБ-гемин методом электроспиннинга.

Основной целью данного исследования была оценка изменений структуры и свойств ПГБ под воздействием гемина, а также оценка влияния молекулярных комплексов гемина на биосовместимость и антимикробную активность.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ МК-1651.2022.1.3.

1. Kumar, P.; du Toit, L. C.; Pradeep, P.; Choonara, Y. E.; Pillay, V. Nanoengineered biomaterials for vascular tissue engineering. Nanoengineered Biomaterials for Regenerative Medicine, 2019, 125–144. DOI:10.1016/b978-0-12-813355-2.00006-5.

2. Ahmed, F. E.; Lalia, B. S.; Hashaikh, R. A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications. Desalination 2015, 356, 15–30. DOI:10.1016/j.desal.2014.09.033.

3. Cerkez, I.; Worley, S. D.; Broughton, R. M.; Huang, T. S. Antimicrobial surface coatings for polypropylene nonwoven fabrics. React Funct Polym 2013, 73(11), 1412–1419. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2013.07.016.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА И ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ В ПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИТАХ, ОБЛАДАЮЩИХ УСКОРЕННОЙ БИОДЕГРАДАЦИЕЙ

Варьян И.А.^{1,2}, Колесникова Н.Н.¹, Попов А.А.^{1,2}

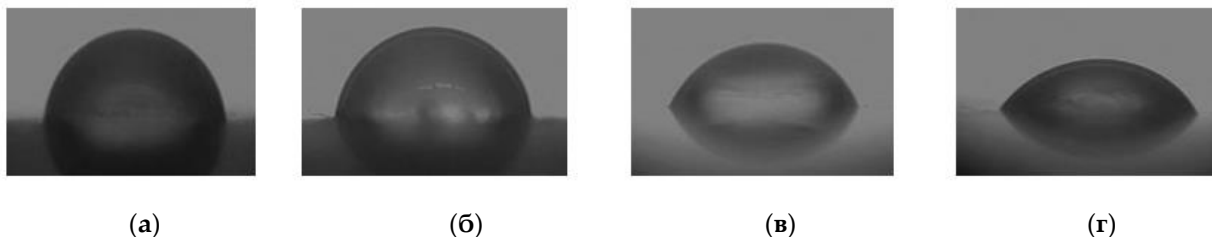
¹Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

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

e-mail: ivetta.varyan@yandex.ru

Растущее количество синтетических полимерных материалов — большая экологическая проблема, которую нужно решить как можно скорее. Основным фактором, усугубляющим эту проблему, является обилие изделий из традиционных синтетических полимеров, таких как упаковочные материалы, ящики, контейнеры и другие изделия с коротким сроком использования, которые быстро превращаются в полимерные отходы, загрязняющие окружающую среду [1].

В данной работе мы рассматриваем возможность решения этой проблемы путем разработки биоразлагаемых композиций на основе полиолефинов и эластомеров. Добавление натурального компонента (натурального каучука) в матрицу из синтетического полимера (полиэтилена низкой плотности) приводит к значительным изменениям структуры и свойств материала. Происходит смешение полукристаллических и аморфных полимеров. Было показано, что добавка 10–50 массовых % эластомера в синтетический полимер увеличивает смачиваемость материала (рисунок 1), незначительно снижает механические свойства, существенно влияет на надмолекулярную структуру, кристаллическую фазу полиэтилена и инициирует микробиологическую деградацию.



Результаты измерения контактного угла смачивания. ПЭНП 100 (а), ПЭНП/НК 90/10 (б), ПЭНП/НК 70/30 (в), ПЭНП/НР 50/50 (г).

В работе показано влияние добавки природного происхождения натурального каучука на структуру и свойства синтетического полиолефина. ПЭНП и НК представляют собой термодинамически сложную систему двух полимеров: кристаллического и аморфного, что существенно влияет на свойства и формирование надмолекулярной структуры композитов. Установлено, что натуральный каучук существенно не снижает физико-механические характеристики композитов, однако позволяет получать биоразлагаемые пленочные материалы. Биodeградация достигается за счет повышения гидрофильности материала, что позволяет микробиотам эффективно заселять поверхность, инициируя процесс биodeградации при компостировании в почву. НК также является субстратом для более активного развития микробиоты на поверхности композита.

Пленочные материалы занимают первое место среди полимерных изделий сельскохозяйственного назначения. Значительный интерес к использованию мульчирующих пленок с целью уничтожения сорняков, удержания влаги, удобрений, обеспечения лучшей микросреды для растений и защиты от неблагоприятных климатических условий привел к бурному росту рынка сельскохозяйственной полиэтиленовой пленки и, как результат, стала проблема переработки тонн накопленных сельскохозяйственных пластиковых отходов. Сегодня эта работа открывает перспективы создания биоразлагаемых пленочных материалов для сельского хозяйства, упаковки, упаковки и других направлений легкой промышленности.

1. Крутько Э. Т., Прокопчук Н. Р., Глоба А. И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов. Минск: БГТУ. 2014. 105 с.

КОНФИГУРАЦИИ КРИВЫХ, ПРИТЯГИВАЮЩИХ СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ ПРОТЯЖЁННЫХ ОДНОМЕРНЫХ СИСТЕМ

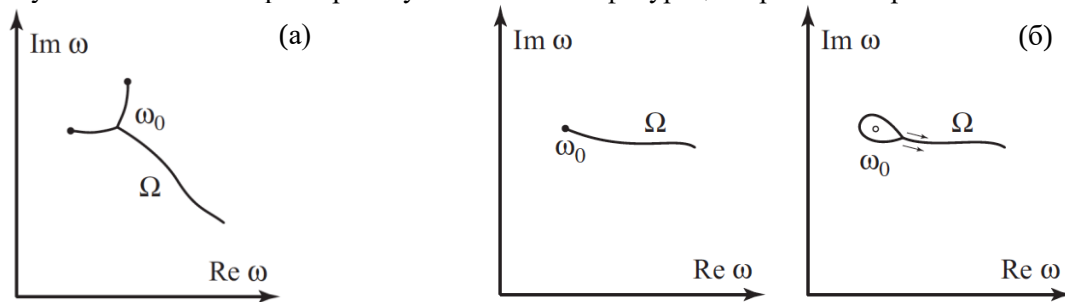
Веденеев В.В., Подопросветова А.Б.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: vasily@vedeneev.ru

Известно [1], что комплексные собственные частоты одномерных систем большой протяжённости концентрируются вокруг асимптотической кривой в комплексной плоскости, определяемой дисперсионным уравнением системы. В случае, если часть такой кривой лежит в верхней полуплоскости комплексной плоскости, то система достаточно большой длины неустойчива; такая неустойчивость называется глобальной. Глобальная неустойчивость исследовалась в физических системах самой разной природы: течение Пуазейля в трубе конечной длины, термокапиллярная конвекция, струйные течения жидкости, упругие пластины в потоке несжимаемой жидкости, спиральные волны, устойчивость пламени, течение Куэтта магнитной жидкости, вибрации труб с движущейся внутри жидкостью, флаттер панелей обшивки сверхзвуковых летательных аппаратов, течения над углублениями и при исследовании других задач [2, 3].

В настоящей работе уравнение кривой, служащей аттрактором собственных значений при больших размерах системы, обобщается на случай произвольных собственных частот (ранее оно было получено лишь для участков, расположенных наиболее высоко в комплексной плоскости). Проведен анализ локальной топологии таких кривых и её устойчивости по отношению к малому изменению параметров задачи. Устойчивыми являются регулярная точка кривой, точка разветвления кривой и конец кривой – точка ветвления функции $k(\omega)$. Рассмотрены случаи распада неустойчивой локальной топологии на устойчивые при изменении параметров задачи, проведена классификация возможных бифуркаций кривой. Изучены наиболее характерные устойчивые конфигурации кривой в окрестности мнимой оси.



Вид кривой, содержащей три устойчивые локальные конфигурации: регулярные точки, точка разветвления, концы кривой (показаны кружками) (а). Одна из возможных бифуркаций топологии асимптотической кривой – появление петли (б).

Полученные результаты продемонстрированы на двух задачах: флаттер пластины в сверхзвуковом потоке газа [4] и колебания мягкой эластичной трубки, содержащей текущую жидкость [5]. Второй случай особенно интересен, т.к. содержит несколько нетривиальных бифуркаций топологии асимптотических кривых. В обоих случаях численно прослежено, как удлинение системы приводит к движению и взаимодействию собственных частот в комплексной плоскости, и их концентрации около асимптотических кривых.

Исследование В.В. Веденева выполнено за счет гранта РФФИ № 20-19-00404.

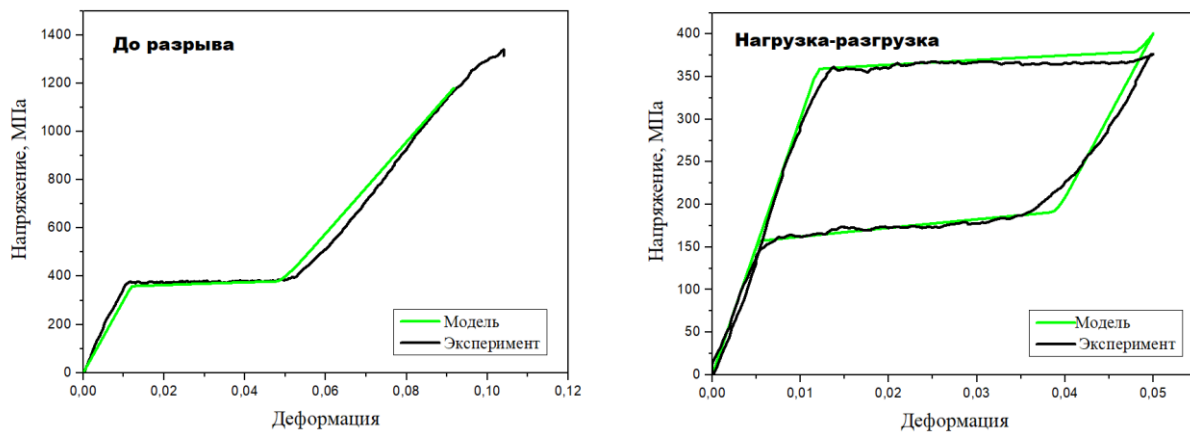
1. Куликовский А.Г. Об устойчивости однородных состояний// ПММ. 1966. Т. 30, No 1. С. 148–153.
2. Doare O., de Langre E. The role of boundary conditions in the instability of one-dimensional systems// Eur. J. Mech. B/Fluids. 2006. V. 25, N 6. P. 948–959.
3. В. В. Веденеев. О применении асимптотического метода глобальной неустойчивости в задачах аэроупругости// Труды МИАН. 2016. Т. 295. С. 292–320.
4. В. В. Веденеев. Флаттер пластины, имеющей форму широкой полосы, в сверхзвуковом потоке газа// Изв. РАН. МЖГ. 2005. № 5. С. 155–169.
5. A. Podoprosvetova, V. Vedeneev. Axisymmetric instability of elastic tubes conveying power-law fluids// Journal of fluid mechanics. 2022. Vol. 941. A61.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПРОВОЛОК ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ветрова А.В., Козулин А.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
e-mail: aniuta-vetrova@mail.ru

Изучено реологическое поведение образцов микропроволоки из никелида титана, используемой в медицинских приложениях [1]. Проволока составом Ti-50 ат. % Ni и толщиной 40 мкм была получена с использованием термомеханической обработки из монолитных слитков с промежуточными отжигами. Образцы микропроволок из NiTi толщиной 40 мкм и длиной 100 мм испытаны при одноосном растяжении до разрушения и циклического растяжения без разрушения в пределах обратимой мартенситной деформации. Экспериментальные результаты, представлены на рисунке черными кривыми.



Сравнение экспериментальных результатов с численными.

На кривых растяжения выделены три характерные зоны: первая - упругое поведение аустенита В2 до деформации в пределах 1 %, реологически описываемое линейно-упругой средой Гука с модулем упругости E_a ; вторая - превращение аустенита в мартенсит в виде плато параллельного оси деформации продолжительностью до 5 %, описываемое жесткой средой Мизеса с параметром течения σ_s равным пределу упругости; третья – упругое деформирование мартенситной фазы вплоть до разрушения при относительном удлинении до 11 %, по аналогии с упругостью аустенитной фазы, описывается линейно-упругой средой Гука с модулем упругости E_m . Разрушение при растяжении наступало по квазихрупкому сценарию без признаков нелинейного поведения, свойственному пластической деформации сплавов. При циклическом нагружении разгрузку начинали в конце области плато, при этом диаграмма имела вид гистерезиса и заканчивалась полным восстановлением первоначальной длины проволоочного образца. Поведение материала образцов случаях характеризовалось сверхэластичным поведением.

Основываясь на анализе экспериментальных данных, на основе Auriccho F. в [2], создана физико-математическая модель, учитывающая особенности сверхэластичного поведения материала в проволоочных образцах при нагрузке и разгрузке. Полученные численно результаты, представленные на рисунке зеленым цветом, согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России проект №FSWH-2020-0022.

1. Марченко Е.С., Ясенчук Ю.Ф., Гюнтер С.В., Козулин А.А., Ветрова А.В., Полонянкин А.С., Фатюшина О.А., Вусик А.Н. Клиническое применение металлотрикотажа из никелида титана на основе количественной оценки реологического подобия мягким биологическим тканям // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2022. Т.25. № 2 (81). С. 68-81.

2. Auriccho F. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model // International Journal of Plasticity. 2001. 17. 971-990.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ

Володин И.В.¹, Алабужев А.А.^{1,2}

¹Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН, Пермь

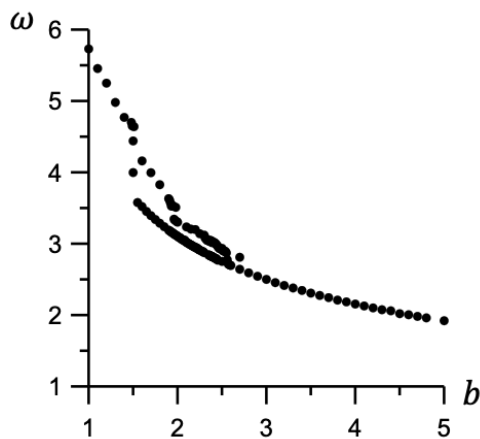
²Физический факультет ПГНИУ, Пермь

e-mail: ivanwolodin@gmail.com

Влияние вибраций является важным объектом исследований в различных областях науки и техники. Это связано с тем, что они могут влиять на эффективность и надежность технических устройств, приводить к повреждению материалов и конструкций, влиять на здоровье человека и давать новые знания о свойствах материалов [1, 2, 3]. Помимо этого, изучение динамики таких систем представляет большой интерес для фундаментальных исследований [4, 5].

Настоящая работа посвящена изучению динамики тонкой пленки жидкости со свободной границей с вертикальным градиентом температуры под действием вибраций. Рассматривается бесконечная тонкая горизонтальная пленка жидкости, подогреваемая сверху. Нижняя подложка, на которой располагается жидкость, является твердой и совершает колебания заданной частоты и амплитуды. Среда считается вязкой и несжимаемой. Верхняя граница – свободная, над пленкой находится невесомый газ, не оказывающий влияния на движение свободной границы.

Задача решается методом многих масштабов. Вводятся перемасштабированные пространственные и временные переменные, рассматривается случай малых частот и больших амплитуд.



Карта устойчивости режимов течения.

Получено эволюционное уравнение динамики поверхности раздела, решена линейная задача устойчивости малых колебаний. Проведен численный анализ нелинейного уравнения эволюции свободной поверхности. На рисунке приведена полученная карта устойчивости режимов течения. Установлено, что возбуждение происходит жестким образом, существуют две моды колебаний, а развитие неустойчивости зависит от направления модуляции перемасштабированного ускорения свободного падения.

Работа И.В. Володиной поддержана бюджетной темой № 121112200078-7.

1. Блехман И. Что может вибрация? – М.: Наука, 1988.
2. Соустин Б., Тестоедов Н., Рудометкин А., Алькин А. Виброиспытания космических аппаратов – М.: Наука, 2000.
3. Мирсков А., Шиляев С. О вибродиагностике технически сложных промышленных объектов // Электроника: наука, технология, бизнес, 3 (194), 2020, с. 132-135.
4. Volodin I.V., Alabuzhev A.A. Stability of Marangoni convection in a thin film under the influence of vertical vibrations // В сборнике: AIP Conference Proceedings. 29. Сер. "29th Russian Conference on Mathematical Modeling in Natural Sciences" 2021. С. 040010.
5. Shklyaev S., Alabuzhev A.A., Khenner M. Marangoni convection in a thin film on a vertically oscillating plate // Phys. Rev. E, 2015.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОЗДУШНЫЙ ПУЗЫРЕК ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

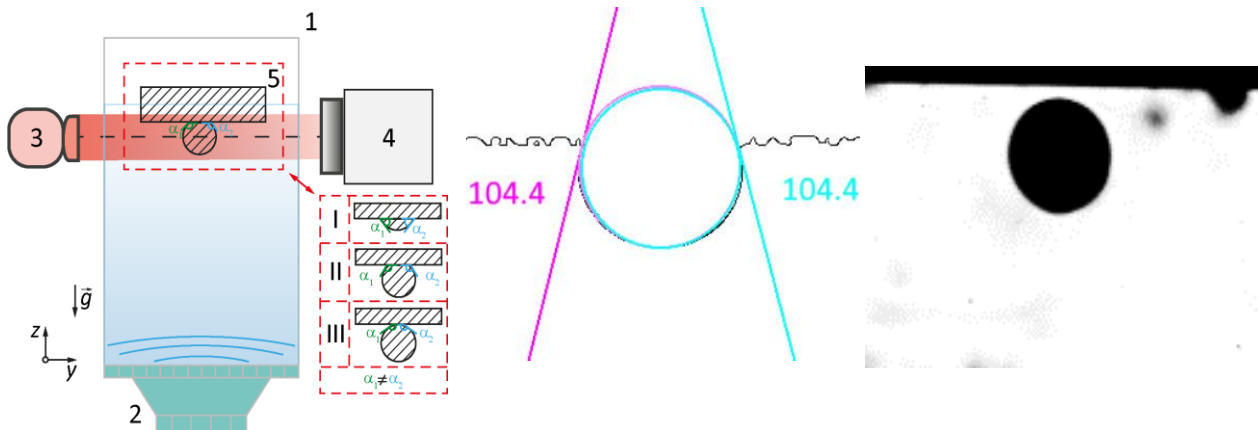
¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь
e-mail: ifonlyheknow@yandex.ru

Поведение пузырька в жидкости под действием ультразвука активно изучается на протяжении последних десятилетий [1] ввиду большого количества эффектов, возникающих как на поверхности пузырька, так и в объеме жидкости или вблизи твердой поверхности [2]. При внешнем силовом воздействии на каплю контактный угол может меняться, описаны явления гистерезиса в случае ультразвуковой вибрации.

Целью данного исследования является определение зависимости краевого угла смачивания от характера твердой поверхности и физико-химических свойств жидкости (концентрации ПАВ)

В экспериментах использовалась кювета, имеющая форму параллелепипеда. Кювета была изготовлена из оргстекла толщиной 3 мм. В центральной части кюветы строго вертикально закреплялись исследуемые пластины. Для регистрации и измерения краевого угла смачивания поверхности использовались SSD камера Basler acA1920-155um, коллимированный источник контрольного света Telecentric HP illuminator, оснащенный телецентрическими макрообъективами. Оптическая система позволяла измерять размер пузырьков вне зависимости от расстояния между ними и матрицей камеры. Минимальный размер фиксируемого пузырька для данной оптической схемы - 48 мкм, при этом глубина резкости составляла 2 см. Пузырьки находящиеся в объеме жидкости имели четкие границы, в том числе те, что были прикреплены к поверхности пластины. Полученные описанным образом фотографии обрабатывались с помощью программы, написанной на Python.



Слева - лабораторная установка: 1) кювета - 103×103×195 мм³; 2) источник ультразвука 3) коллимированный источник света; 4) камера Basler acA1920-155um; 5) исследуемые поверхности; по центру – результат обработки фотографий; справа – отскок пузырька от поверхности кварцевой пластинки.

Измерения контактных углов во время воздействия ультразвука были проведены для пузырьков на следующих поверхностях: тефлон, оргстекло, стекло, фторопласт. Во всех экспериментах наблюдались колебания поверхности пузырька. В случае со стеклом (хорошо смачиваемая поверхность) это приводило к отрыву пузырька от пластинки. От тефлона, оргстекла и фторопласта пузырьки не отрывались. Средний контактный угол до воздействия УЗ на стекле составил 162°, на тефлоне 100°, на оргстекле 95°, на фторопласте 83°. Эксперименты показали, что в результате 40-секундного воздействия ультразвуком контактный угол уменьшается на 8-10° в зависимости от степени гидрофобности поверхности.

1. Influence of Surface Tension on Dynamic Characteristics of Single Bubble in Free-Field Exposed to Ultrasound / Wu Hao, Zhang Tianshu, Lai Xiaochen, Yu Haixia, Li Dachao, Zheng Hao, Chen Hui, Ohl Claus-Dieter, and Li Yuanyuan // Micro-machines. 2022. Vol. 13, №5. P. 782.

2. Shklyaev Sergey, Straube Arthur V. Linear oscillations of a compressible hemispherical bubble on a solid substrate // Physics of Fluids. 2008. Vol. 20, №5. P. 052102.

ЭЛЕКТРОФОРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ С ТОНКОЙ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Ганченко Г.С.¹, Шелистов В.С.¹, Попов В.А.^{1,2}, Пономарев Р.Р.^{1,2}, Демехин Е.А.^{1,3}

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

³Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Электрофорез – это движение заряженных частиц в жидкостях под действием внешнего электрического поля. Электрофорез возникает из-за наличия тонких заряженных слоёв около поверхностей частиц, заряд которых противоположен заряду частицы. Электрофорез диэлектрических частиц имеет долгую историю исследований и берёт начало с работ Смолуховского [1]. Позднее было показано, что линейные модели описывают этот процесс с достаточно хорошей точностью. Электрофорез ионоселективных микрочастиц оказывается более сложным и требует исследования нелинейных моделей [2, 3]. В последнее время начали появляться экспериментальные работы, указывающие на необходимость учета нелинейных эффектов даже около диэлектрических частиц при достаточно больших напряженностях внешнего электрического поля [4].

В докладе будут представлены результаты численного моделирования электрофореза диэлектрической микрочастицы, покрытой тонкой ионоселективной оболочкой, имеющей неидеальную селективность. Моделирование показывает, что даже тонкой оболочки достаточно, чтобы вокруг частицы формировались области, характерные для полностью ионоселективной микрочастицы [3], а скорость электрофореза для стационарных режимов не зависит от поверхностного заряда диэлектрического ядра. Вместе с тем, течение электролита около таких композитных частиц оказывается более устойчивым, чем при электрофорезе полностью ионоселективной микрочастицы.

Модель композитных частиц ядро-оболочка может служить первым приближением в моделировании биологических клеток [5] и в дальнейшем позволит приблизиться к пониманию электрофизических процессов в биологических клетках.

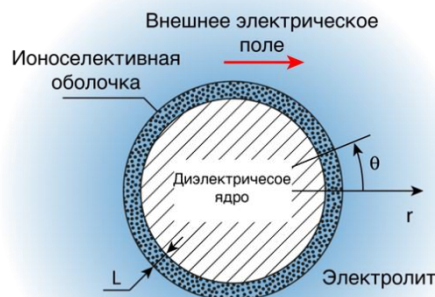


Рис. Схематичное изображение задачи.

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ № 22-79-10085.

1. Smoluchowski M. Contribution a la theorie de l'endosmose electrique et de quelques phenomenes correlatifs // Bulletin de l'Academie des Sciences de Cracovie. 1903.
2. Yariv E. Migration of ion-exchange particles driven by a uniform electric field // Journal of Fluid Mechanics. 2010. (655). С. 105–121.
3. Ganchenko G. S. [и др.]. Instabilities, bifurcations, and transition to chaos in electrophoresis of charge-selective microparticle // Physics of Fluids. 2020. № 5 (32). С. 054103.
4. Tottori S. [и др.]. Nonlinear Electrophoresis of Highly Charged Nonpolarizable Particles // Physical Review Letters. 2019. № 1 (123). С. 014502.
5. Maurya S. K. [и др.]. Electrophoresis of composite soft particles with differentiated core and shell permeabilities to ions and fluid flow // Journal of Colloid and Interface Science. 2020. (558). С. 280–290.

ПОДСКОК ВИБРАЦИОННОГО РОБОТА

Гарбуз М.А.^{1,2}

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

² Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук, Москва

e-mail: misha-garbuz@yandex.ru

Рассматривается плоскопараллельное движение вибрационного робота, состоящего из корпуса, однородного маховика и несбалансированного ротора. Построена математическая модель системы. Показана принципиальная возможность управления ротором, результатом которого является вертикальный подскок робота на заданную высоту и его смещение в продольном направлении. Описаны условия полной остановки корпуса после совершения такого прыжка. Проанализировано смещение корпуса из начального положения. Проведен параметрический анализ.

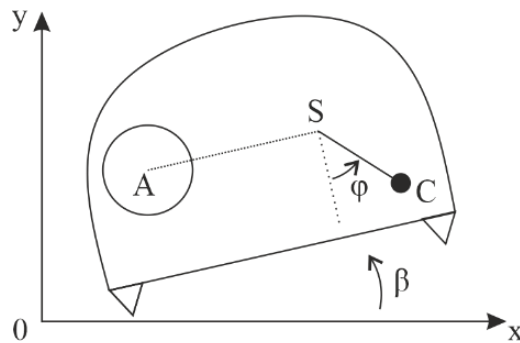


Схема механической системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-21-00303).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛАМИНАРНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

Гареев Л.Р.^{1,2}, Иванов О.О.², Веденеев В.В.^{1,2}

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

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

e-mail: gareev.lr@yandex.ru

В представленной работе изучаются два механизма развития возмущений в струйном течении: модальный, связанный с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, и немодальный (алгебраический), аналогичный «байпасному» механизму, который известен в пристенных течениях [1]. Эксперименты проводились с ламинарным затопленным струйным течением воздуха диаметром $D = 0.12$ м, числом Рейнольдса $Re = 5400$ и длинным ламинарным участком $\sim 6D$ [2].

Модальная неустойчивость течения изучена теоретически и экспериментально [3]. Возмущения, развивающиеся согласно модальному механизму, усиливались в экспериментах при помощи колебаний тонкого металлического кольца. Показано хорошее согласование экспериментальных и теоретических параметров.

Немодальный механизм роста возмущений инициировался при помощи установленных в течение специальных стационарно возмущающих конструкций – «дефлекторов». Было показано, что под их воздействием в струе реализуется «lift-up» механизм и переход к турбулентности происходит отличным от модального механизма путём, а параметры нарастания генерируемых возмущений соответствуют теоретически оптимальным, рассчитанным для данного течения [4].

Также было изучено взаимодействие двух механизмов роста возмущений для различных n и частот модального возмущения. В экспериментах исследовалось нарастание гармонических возмущений в струе, возмущенной установленным дефлектором. Показано, что коэффициент роста возмущений в такой струе меньше, чем в невозмущенной, на расстоянии до 3 диаметров струи, что согласуется с предсказаниями линейной теории [5].

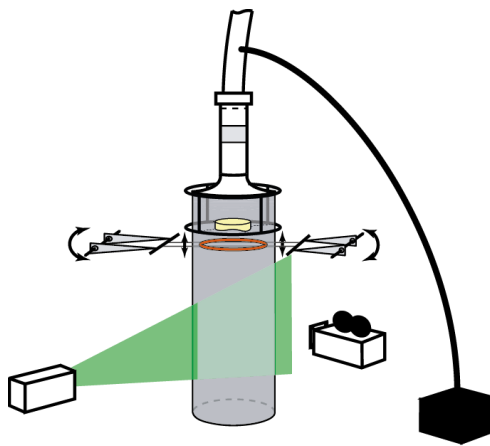


Схема проведения визуализации взаимодействия двух механизмов нарастания возмущения. Желтым цветом обозначен стационарный дефлектор, оранжевым – колеблющееся кольцо.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 20-19-00404).

1. Matsubara M., Alfredsson P. H.: Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence // J. Fluid Mech. 2001. V. 430, P. 149-168.
2. Julia Zayko, Sergei Teplovodskii, Anastasia Chicherina, Vasily Vedeneev, Alexander Reshmin. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // Phys. Fluids 30(043603), 2018.
3. Gareev L.R., Zayko J.S., Chicherina A.D., Trifonov V.V., Reshmin A.I., Vedeneev V.V. Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // J. Fluid Mech. 2022. V.934. P. A3.
4. Ivanov, O., Ashurov, D., Gareev, L., Vedeneev, V. Non-modal perturbation growth in a laminar jet: An experimental study // Journal of Fluid Mechanics. 2023. V. 963. P. A8. doi:10.1017/jfm.2023.286.
5. Wang C, Lesshaft, L., Cavalieri, A. V., Jordan, P. The effect of streaks on the instability of jets // Journal of Fluid Mechanics. 2021. V. 910. P. A14.

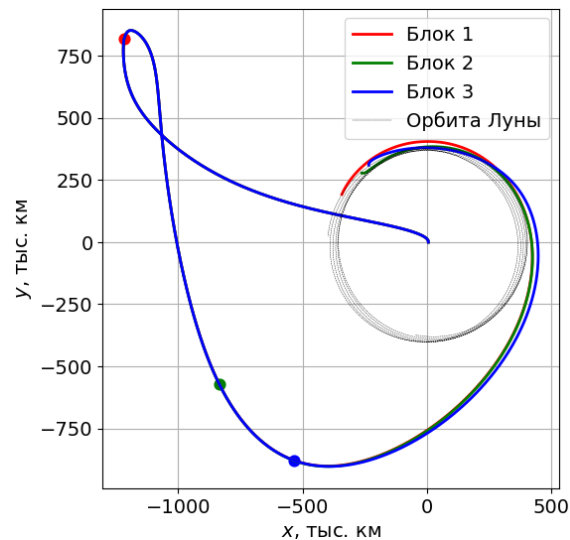
ОДНОПУСКОВОЕ РАЗВЁРТЫВАНИЕ ЛУННОЙ КОНСТЕЛЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАВИТАЦИИ СОЛНЦА

Глазунова И.А., Трофимов С.П., Целоусова А.А.
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
e-mail: glazunova.ia@phystech.edu

Исследование Луны и окололунного пространства – одна из приоритетных целей развития космической отрасли России в дальнем космосе. Промежуточным этапом на пути к ней является создание системы лунной спутниковой связи и навигации на основе группировки космических аппаратов (КА) на окололунных орбитах. Возникает необходимость поиска наиболее экономичных способов доставки большого количества КА к Луне. Осуществлять отдельный запуск для каждой орбитальной плоскости экономически крайне невыгодно, поэтому возникает идея однопускового развёртывания.

В работе рассматриваются низкоэнергетические траектории, использующие гравитацию Солнца (Sun-assisted lunar transfer, SALT), которые позволяют значительно сократить стоимость запуска [1]. Следуя по такой траектории, аппарат удаляется на значительное расстояние от Земли и Луны, затем гравитационное воздействие Солнца поднимает перигей его орбиты, и КА направляется к Луне для баллистического захвата. Для развёртывания лунной констелляции предлагается запуск единой материнской платформы с последующим отделением от неё аппаратов вдали от Луны и выводением в требуемые плоскости путём приложения к ним малых импульсов в течение перелёта.

С помощью библиотеки KIAM Astrodynamics Toolbox [2] моделируется SALT-траектория перелёта КА на почти круговую окололунную орбиту. Исследуются вариации элементов финальной орбиты в результате приложения малого импульса вдоль траектории. Выявляются оптимальные величины, направления и моменты приложения импульсов для развёртывания многоспутниковой лунной констелляции [3]. На примере развёртывания констелляции в трёх орбитальных плоскостях демонстрируется возможность значительной экономии топлива.



Низкоэнергетические траектории перелёта на окололунные орбиты
во вращающейся геоцентрической системе координат Солнце-Земля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №19-11-00256)

1. Topputo F. On Optimal two-impulse Earth-Moon transfers in a four-body model // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2013. V. 117. P. 279-313.

2. Широбоков М.Г. Страница программной библиотеки KIAM Astrodynamics Toolbox на GitHub. URL: <https://github.com/shmaxg/KIAMToolbox> (дата обращения 23.05.2023).

3. И.А. Глазунова, С.П. Трофимов, А.А. Целоусова. Исследование чувствительности низкоэнергетических траекторий перелёта к Луне // 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный-Жуковский, 3-8 апреля 2023 г.

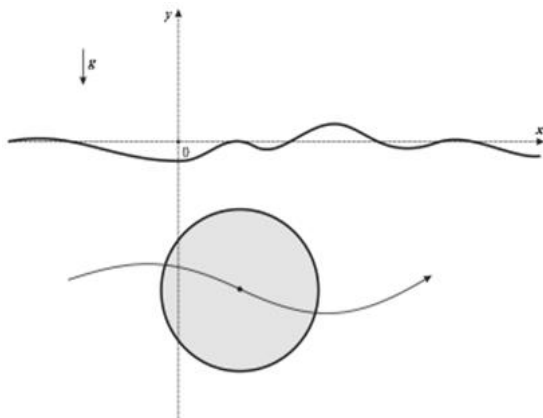
НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЦИЛИНДРА ПОД СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Голиков А.Е., Макаренко Н.И.

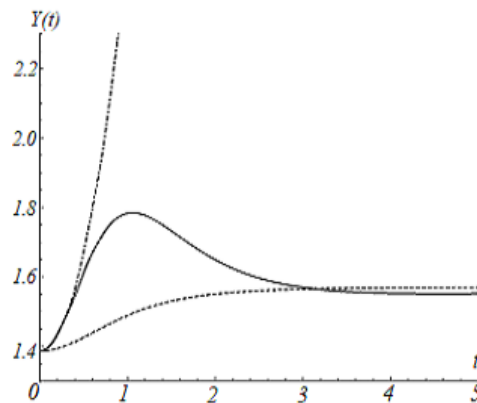
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: a.golikov@alumni.nsu.ru, makarenko@hydro.nsc.ru

Рассматривается нелинейная задача о неустановившемся движении кругового цилиндра под свободной поверхностью бесконечно глубокой идеальной жидкости. Данная задача актуальна в связи с изучением поведения морских конструкций и плавающих тел на волнении. Используется метод сведения исходной начально-краевой задачи для гидродинамических уравнений Эйлера к эквивалентной системе интегро-дифференциальных уравнений для функции, задающей форму свободной поверхности, а также для нормальной и тангенциальной составляющих скорости на свободной поверхности [1-3].



(а)



(б)

(а) Общая схема движения. (б) Зависимость нагрузки от времени t при вертикальном погружении цилиндра: сплошная линия – дробно-рациональное приближение точности $O(t^4)$; штриховая линия – такое же приближение точности $O(t^2)$; штрихпунктирная линия – степенное разложение точности $O(t^4)$.

Исследована начальная по времени асимптотика решения задачи при разгоне цилиндра из состояния покоя и определены нестационарные нагрузки на цилиндр, действующие на ранней стадии движения. Получены приближенные аналитические формулы для нагрузок, описывающие их зависимость от времени, направления движения, начального заглубления тела и его ускорения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71-20039).

1. Makarenko N.I. Nonlinear interaction of submerged cylinder with free surface, JOMAE Trans. ASME, 2003, V. 125, № 1, P 72-75.

2. Kostikov V.K., Makarenko N.I. Unsteady free surface flow above the moving circular cylinder. J. Engng. Math., 2018, V. 112, P. 1-16.

3. Голиков А.Е., Макаренко Н.И. Гидродинамические нагрузки при разгоне цилиндра под свободной поверхностью, ПМТФ, 2022, Т. 63, № 5, С. 89-99.

ПРЕОДОЛЕНИЕ КРАЕВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГУСЕНИЧНЫМ РОБОТОМ

Голованов С.А.

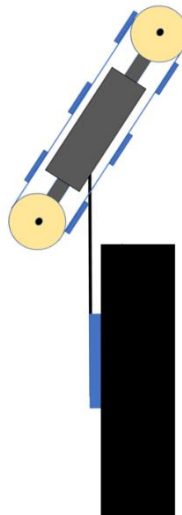
Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

НИИ механики МГУ, Москва

e-mail: serj-great@mail.ru

Роботы, способные передвигаться по наклонным и отвесным поверхностям, востребованы в промышленности. Они используются для таких целей как: обследование корпусов надводных и подводных кораблей, мойка окон и проведение работ на высотных зданиях, мониторинг состояния резервуаров с радиохимически опасными веществами и т.д. Для фиксации на поверхности, в зависимости от ее типа, используют различные виды адгезии: механическая, электромагнитная, вакуумная, межмолекулярная и т.д. От типа поверхности зависит также тип роботов: шагающие, колесные, гусеничные и др. Различные варианты таких роботов рассмотрены в [1]. Большинство видов роботов используются на «удобных» поверхностях без выступов, препятствий и границ. Тем не менее, в приложениях существуют ситуации, когда роботу необходимо самостоятельно перемещаться с одной поверхности на другую: подъем/спуск со стены, преодоление вертикальной преграды и пр. [2].

В настоящей работе исследуется гусеничный робот с манипулятором. На гусеницах и манипуляторе установлены постоянные магниты. Магниты на гусеницах предназначены для движения по металлической наклонной поверхности; манипулятор предназначен для помощи в преодолении края поверхности. Рассматриваются различные препятствия, возникающие на пути передвижения робота и разбираются методы их преодоления с помощью манипулятора.



Для каждого вида препятствия разработан отдельный алгоритм его преодоления, найдены необходимые характеристики двигателей и сервоприводов, проведена оценка требуемой мощности магнитов на манипуляторе и на гусеницах в зависимости от типа поверхности.

1. Сырых Н.В., Чашухин В.Г. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. №. 5. С. 163-173.

2. Серебрянный В.В., Лапин Д.В., Мокаева А.А. Экспериментальные исследования динамики мобильного робота с механизмом вертикального перемещения на магнитных гусеничных движителях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. №. 4. С. 68-75.

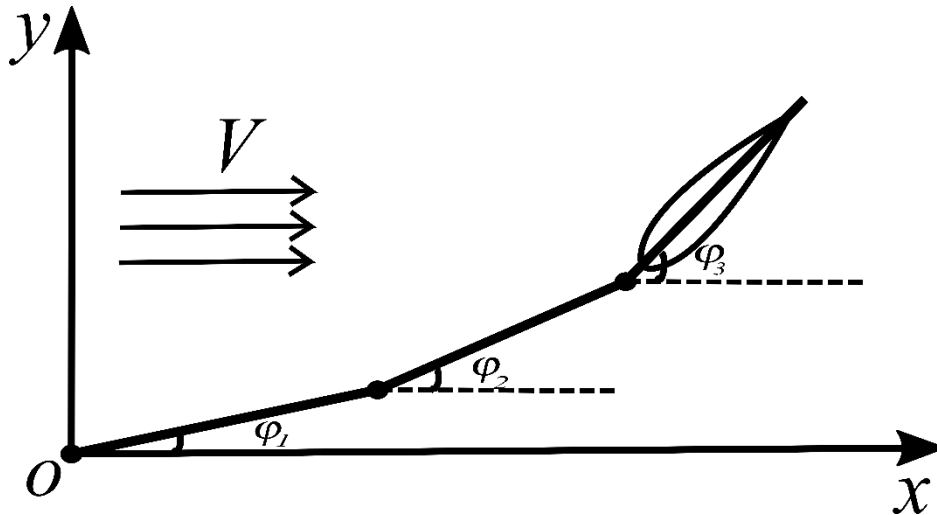
ДИНАМИКА ТРЁХЗВЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Голуб А.П.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: holub.imech.g@lecturer.msu.ru

В работе рассматривается трёхзвенный маятник, на третьем звене которого, расположен симметричный аэродинамический профиль. В межзвенных шарнирах маятника (между первым и вторым, вторым и третьем звеньями) закреплены пружины. Вся система помещена в поток воздуха, скорость которого на бесконечности постоянна. Исследуется влияние жёсткости пружин и положение крыла на втором звене на движение маятника. В работах [1-2] была рассмотрена похожая система с двухзвенным маятником.



Трёхзвенный аэродинамический маятник (вид сбоку).

Для описания аэродинамического воздействия была использована квазистатическая модель, в рамках которой, оно сводилось к силе сопротивления, подъёмной силе и крутящему моменту. В качестве профиля, был выбран аэродинамический профиль NACA0015. Составлена система уравнений, описывающая поведение трёхзвенного маятника. Проведено численное моделирование полученных уравнений.

Предполагается использовать такую механическую систему для преобразования энергии ветра в механическую энергию. Преимуществами данной системы может служить низкая скорость старта и то, что она будет работать при любом направлении ветра.

Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 22-29-00472).

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-закреплённого аэродинамического двухзвенного маятника // Труды конференции-конкурса молодых учёных НИИ механики МГУ. 2018. С. 77-81.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЯ СОЛИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПРИ НАГНЕТАНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ

Гречко С.С.^{1,2}

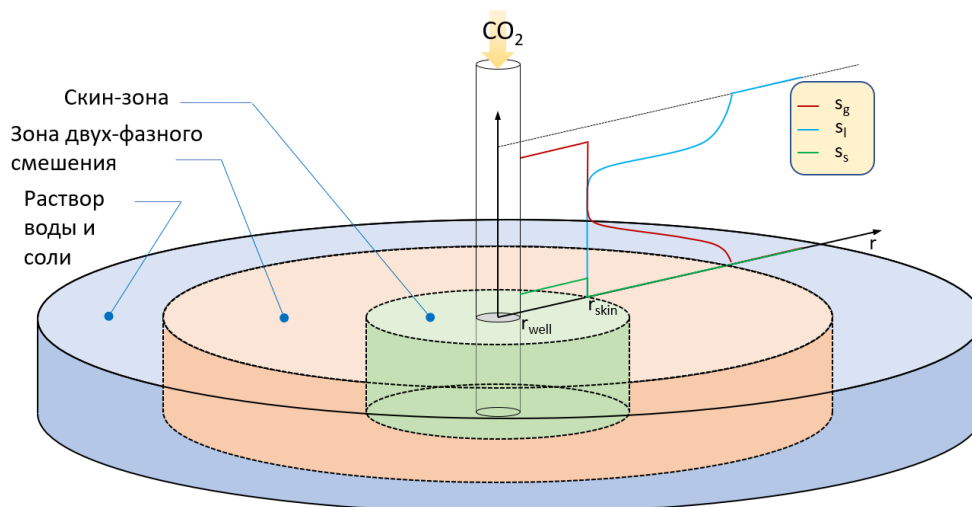
¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

e-mail: grechkoss@my.msu.ru

Процесс нагнетания углекислого газа в водонасыщенные пласты, содержащие растворенную соль, в рамках технологии улавливания и хранения углерода (CCS) может быть осложнен возникающими структурными изменениями пористой среды. Осаждение соли, растворенной в пластовой воде, вызывает частичное закупоривание поровых пространств в призабойной зоне скважины (ПЗС), что в свою очередь сказывается на приёмистости – эффективности – нагнетательной скважины. В качестве меры изменения проницаемости пород ПЗС используется скин-фактор, характеризующий перепад давления, вызванный уменьшением потока флюида в области осаждения. Предварительный анализ этого параметра способствует дальнейшей оценке рентабельности и эффективности рассматриваемого способа захоронения углекислого газа.

Данное исследование направлено на получение количественной оценки скин-фактора при заданном закачанном объеме сухого газа. В ходе работы в явном виде получено соотношение для точной оценки скин-фактора, позволяющее быстро проанализировать приемистость скважины, не прибегая к численному моделированию фильтрационного течения. Проведено сравнение полученного соотношения с результатами гидродинамического моделирования трехфазного фильтрационного течения в широком диапазоне пластовых условий. Показано, что кривая насыщенности состоит из двух ударных волн и на внутреннем разрыве, соответствующем распространению скин-зоны, испаряется не только неподвижная, но и подвижная вода. Проведен численный расчет на модели, учитывающей наличие силы тяжести, и выполнено сравнение расчетного и оценочного значения скин-фактора.



Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 19-71-10051, <https://rscf.ru/project/19-71-10051/>.

РЕЗОНАНСНЫЕ КРУТИЛЬНЫЕ АЭРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА КОНЕЧНОГО РАЗМАХА В УПРУГОМ ПОДВЕСЕ

Демченко Я.В.^{1,2}, Веденеев В.В.^{1,2}, Зубков А.Ф.^{1,2}

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

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

e-mail: yardemchenko@yandex.ru

В работе исследуется задача воспроизведения и выявления механизмов поддержания незатухающих нелинейных резонансных колебаний упруго закрепленного цилиндра в потоке сплошной среды с возможностью частичного отбора мощности колебаний. Актуальность и практическая значимость данной задачи определяется её связью с ведущимся в мире поиском принципов проектирования новых типов ветрогенераторов без использования вращающихся и/или трущихся элементов.

Объектом исследования является система, состоящая из жесткого тонкостенного цилиндра конечного размаха, установленного на упругой консольной балке поперечно направлению дозвукового воздушного потока в аэродинамической трубе. Цель исследования - выявление и анализ механизмов различных типов аэроупругих резонансных возбуждений системы для использования в конструкциях ветрогенераторов на основе вихревых колебаний (VIV). Представлены результаты экспериментального исследования. В отличие от аналогичных работ с аналогичной конфигурацией модели, совершающей поперечные поступательные колебания [1]-[3], нами обнаружен неисследованный ранее тип VIV, в котором цилиндр вращается около продольной оси консольной державки.

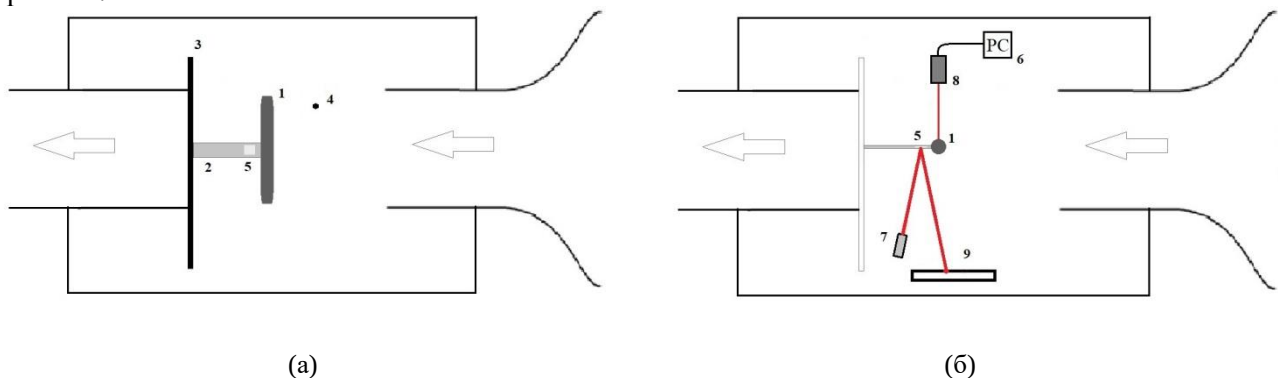


Схема эксперимента; (а) – вид сбоку; (б) – вид сверху; 1 – круглый цилиндр; 2 – жестко закрепленная балка; 3 – жесткая массивная опора; 4 – термоанемометр; 5 – зеркало; 6 – ПК; 7 – лазерная указка; 8 – триангуляционный лазерный датчик; 9 – экран.

Эксперименты проводились в НИИ механики МГУ в аэродинамической трубе А-10 с камерой Эйфеля и открытой рабочей частью. Экспериментально выявлены незатухающие изгибные и крутильные колебания, соответствующие состоянию резонанса. Предложены безразмерные параметры, определяющие качественную картину колебаний. Проведена визуализация течения за колеблющимся цилиндром.

1. Williamson, C.H.K., Govardhan, R., 2004. Vortex-induced vibrations. Annu. Rev. Fluid Mech. 36, 413–455.
2. Dai, H.; Abdelkefi, A.; Wang, L. Piezoelectric energy harvesting from concurrent vortex-induced vibrations and base excitations. Nonlinear Dyn. 2014, 77, 967–981.
3. Oleg Ivanov, Vasily Vedeneev. Vortex-induced vibrations of an elastic cylinder near a finite-length plate // Journal of Fluids and Structures. 2021. Vol. 107. 103393.

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОСМИЧЕСКОГО ЛИФТА

Денисов Е.А.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва
e-mail: denisov.egor@phystech.edu

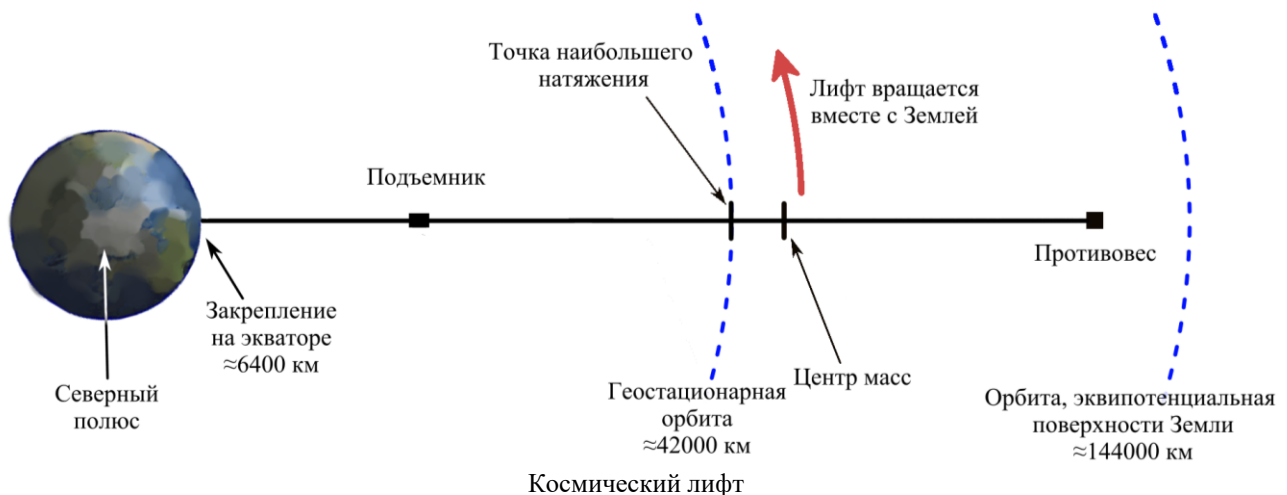
Основоположником космонавтики К.Э.Циолковским была высказана идея «космического лифта» – платформы, выведенной на орбиту, выше геостационарной, и удерживаемой на ней тросом, натянутым центробежными силами вращения Земли. Эта идея, трудно реализуемая технически, является физически непротиворечивой и заслуживает научного анализа, который предпринимается исследователями разных стран [1].

В данном сообщении излагаются результаты построения механической модели космического лифта и исследования базовых параметров его конструкции с точки зрения статической прочности троса [2], а также волновых и колебательных процессов в тросе. Основным элемент лифта – трос моделируется гибкой упругой нитью равного сопротивления, находящейся в переменном поле гравитационно-центробежных сил. Нижнее сечение троса закреплено на экваторе Земли, а верхнее соединено с технологической платформой, играющей роль противовеса.

На основе этой модели исследованы особенности напряженного состояния троса в состоянии статического равновесия. Показано, что существенным параметром является соотношение между скоростью поперечных волн в тросе и частотой вращения Земли, которое обеспечивается высокой удельной прочностью материала. Найдена зависимость между массой технологической платформы и высотой ее орбиты, при которых в тросе реализуется натяжение, необходимое для функционирования подъемного устройства, «развозящего» космические аппараты. Установлено, что эта зависимость существенно различна при размещении платформы ниже или выше орбиты, эквипотенциальной поверхности Земли.

Исследованы возможные типы бегущих и стационарных волн в тросе равного сопротивления, обладающих дисперсией. Получены дисперсионные зависимости, которые оказались различными для рабочей (ниже геостационара) части троса и пассивной (между геостационарной орбитой и орбитой платформы). Исследованы собственные частоты и формы колебаний троса.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке практических конструктивных схем космического лифта и требований к перспективному материалу троса.



Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-19-00678.

1. International Space Elevator Consortium: официальный сайт. URL: <https://www.isec.org>. (Дата обращения: 10 июня 2023).

2. Валиуллин А.А., Васильченко Л.Б., Данилин А.Н., Денисов Е.А., Онучин Е.С., Фельдштейн В.А. Механические автоколебания проводов воздушных линий электропередачи. Концепции, теория, практика. // XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург, 21-25 августа 2023. С.

ВЛИЯНИЕ МОНОДИСПЕРСНОЙ ЗАСЫПКИ НА КОЛЕБАНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

Евко Е.А., Пузина Ю.Ю.

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва
e-mail: evgeniievko@gmail.com

Одной из проблем описания гелия-II является отсутствие аналитических подходов к расчету взаимодействия двух движений (нормального и сверхтекучего) при высоких тепловых потоках, в том числе при наличии границы раздела фаз пар - жидкость. Вместе с тем использование гелия для криостатирования сверхпроводящих систем приводит к необходимости разработки теплообменного оборудования устойчивого по отношению к импульсному тепловыделению, приводящему к появлению пара. В то же время многоканальная система должна обеспечивать нераспространение нормальной зоны и сокращение объемов парового пространства.

В работе [1] показано как ведет себя сверхтекучий гелий в U-образном канале. При подаче тепловой нагрузки больше определенной величины в канале возникают постоянные устойчивые колебания с амплитудой и частотой, которые зависят от условий эксперимента: глубины погружения нагревателя, температуры жидкости и тепловой нагрузки.

В настоящей работе для создания стесненных условий в экспериментальной ячейке (U-образном канале) использована засыпка монодисперсных шариков из металлического сплава диаметром 240 ± 5 мкм, которые располагаются в нижней части стеклянной трубки. Для изучения влияния такой пористой среды на поведение сверхтекучего гелия, проведено 18 экспериментальных серий со стационарной удельной тепловой нагрузкой от 12 кВт/м^2 до 128 кВт/м^2 . При подаче нагрузки больше определенной величины на поверхности нагревателя образуется пар, и жидкость начинается двигаться вниз. После этого возможно как достижение стационарного положения границы раздела фаз, так и возникновение низкочастотных колебаний. Характер движения зависит от температуры жидкости в объеме и глубины погружения. В результате обработки видеок кадров экспериментов определяется расстояние от нагревателя до межфазной границы He-II – пар (рис. 1). Обнаружены колебания с амплитудой 4-8 мм и частотой 2,3 Гц при среднем давлении 3300 Па. При давлении около 700 Па амплитуда колебаний составляет 1-2 мм, что существенно меньше, чем аналогичные колебания в свободном канале [1] при тех же условиях (амплитуда 80-90 мм). Таким образом, оказывается, что пористая засыпка подавляет развитие колебаний жидкости и границы раздела фаз пар – жидкость, возникающих в сверхтекучей жидкости.

После перехода через λ -точку колебания в обычной жидкости (гелий-I) прекращаются, а на внешней поверхности трубки фиксируется возникновение пузырькового режима кипения.

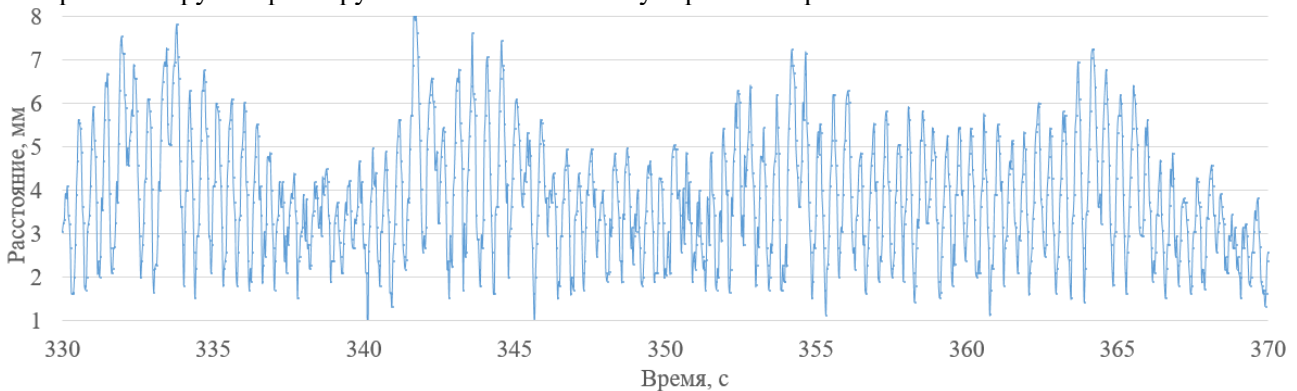


Рис.1 Колебания межфазной поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект №23-29-00342).

1. Евко Е.А., Пузина Ю.Ю., Ячевский И.А. Исследование движения гелия-II в U-образном канале. // Тезисы докладов XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 23-27 мая 2023г. Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2023 г. стр. 176-177.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ PIV НА СВЕРХЗВУКОВОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Загайнов И.А.^{1,2}, Попович С.С.¹, Здитовец А.Г.¹, Киселев Н.А.¹, Виноградов Ю.А.¹

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

² МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: iz1721@mail.ru

Наиболее известным среди панорамных методов является метод анемометрии по изображениям частиц PIV (Particle Image Velocimetry) [1, 2]. Метод PIV находит широкое применение в практике исследований течения газов с высокими сверхзвуковыми скоростями. В рамках работы производится отладка двумерной двухкомпонентной системы «Сигма Про» на базе сверхзвуковой аэродинамической установки AP-2 [3].

Рабочая часть аэродинамической установки имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами 70х98 мм. Число Маха на выходе из сопла – 3.0, давление торможения – 450 кПа, температура торможения – 293 К. Система PIV включала в себя: генератора аэрозоля Dantech с жидкостью DEHS, систему освещения потока на основе двойного импульсного Nd:YAG лазера Beamtech с длиной волны 532 нм, цифровую ПЗС-камеру с кадровой частотой на полном разрешении до 15 Гц и синхронизирующий процессор Polis SP-10.0ПС. Плоское сопло образовано стальными гибкими верхней и нижней пластинами, обеспечивающими возможность поджатия критического сечения сопла для изменения числа Маха на срезе. Боковые стенки сопла выполнены из оптического стекла.

Произведены тестовые запуски с различными видами трассеров: частицами DEHS, жидким углекислым газом и дистиллированной водой. Улучшена плотность и равномерность засева частицами по сечению рабочей части установки за счет удаления области засева выше по потоку от сопла. Получены картины двумерного поля скорости в центральной части сверхзвукового канала и на обтекаемых верхней и нижней стенке рабочей части.

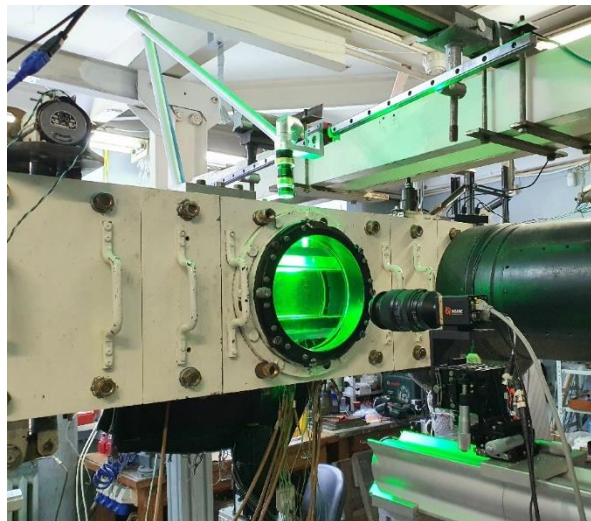


Фото экспериментального стенда

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ.

1. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 125–158.

2. Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М. История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 1. С. 1-24.

3. Егоров К.С., Загайнов И.А., Попович С.С. Экспериментальная отработка панорамного метода исследования анемометрии по изображениям частиц на сверхзвуковой аэродинамической установке // Будущее машиностроения России: сб. докл. XV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием), Т. 2. М: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 12-16.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЗАСЕВА СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В СИСТЕМЕ PIV

Загайнов И.А.^{1,2}, Попович С.С.¹, Егоров К.С.²

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

² МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: iz1721@mail.ru

Панорамные (полевые) методы измерений позволяют измерять мгновенные распределения физических величин, выявлять в потоке когерентные структуры, исследовать нестационарные потоки и быстропротекающие процессы [1]. Наиболее известным среди панорамных методов является анемометрия по изображениям частиц PIV (Particle Image Velocimetry) [2].

Метод PIV находит широкое применение в практике исследований течения газов с высокими сверхзвуковыми скоростями. Первые работы по использованию метода PIV в сжимаемых течениях датируются 1988 г. (Moraitis C.S., Riethmuller M.L., Kompenhans J. et al.), при высоких сверхзвуковых скоростях (больше $M=4$) публикации начали появляться с 2002 года (Haertig J., Havermann M. et al.).

В рамках работы произведена отладка двумерной двухкомпонентной системы «Сигма Про» на базе сверхзвуковой аэродинамической установки AP-2 [3]. Представлены результаты сравнительного исследования применимости различных типов трассеров для засева потока: частицы DEHS, жидкий углекислый газ и дистиллированная вода, подаваемая через форсунки в форкамере установки.

Наилучшее качество засева было получено при использовании жидкости DEHS. Засев углекислым газом приводил к туманообразованию в сверхзвуковой области с неравномерным распределением частиц по сечению и, по-видимому, слишком малому (меньше 1 мкм) размеру формируемых частиц. Капли дистиллированной воды, формируемые форсунками, оказались напротив слишком крупными (десятки микрометров), чтобы можно было утверждать установление динамического равновесия с несущим потоком.

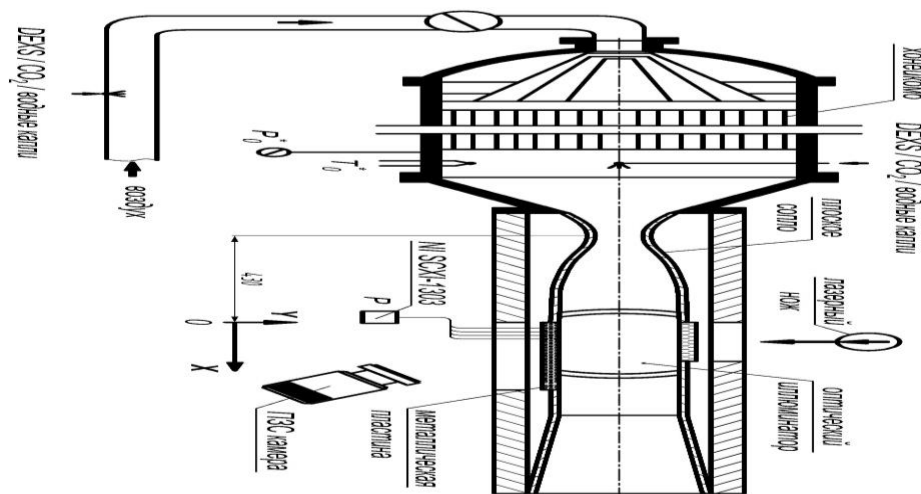


Схема проведения исследования

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ.

1. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 125–158.

2. Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М. История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 1. С. 1-24.

3. Егоров К.С., Загайнов И.А., Попович С.С. Экспериментальная отработка панорамного метода исследования анемометрии по изображениям частиц на сверхзвуковой аэродинамической установке // Будущее машиностроения России: сб. докл. XV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием), Т. 2. М: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 12-16.

ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПРЕПЯТСТВИИ ПРИ ИНИЦИИРОВАННИИ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА

Иванова А.А.¹, Мурсенкова И.В.¹

¹ Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: militcina.aa18@physics.msu.ru

Целью работы было экспериментальное исследование структуры нестационарного течения после дифракции плоской ударной волны с числом Маха $M=2,9-4,4$ на малом препятствии в канале ударной трубы прямоугольного сечения 48×24 мм². Визуализация процессов осуществлялась с помощью прямого теневого метода и фоторегистрации свечения наносекундного комбинированного объемного разряда; оптическая диагностика поворачивалась через кварцевые стекла рабочей секции [1].

Фронт исходной ударной волны представляет плоскость, перпендикулярную стенкам канала ударной трубы. Препятствие размером $48 \times 6 \times 2$ мм³ было расположено на нижней стенке рабочей секции внутри разрядного объема. Ширина препятствия соответствовала ширине канала рабочей секции, что позволяло считать исследуемое течение двумерным. Регистрация теневых изображений осуществлялась высокоскоростной камерой с частотой 150 000 кадров в секунду. Комбинированный объемный разряд длительностью ~ 500 нс инициировался в воздухе при импульсном напряжении 25 кВ, начальном давлении $p_0 = 10-30$ Торр в различные моменты времени после прохождения ударной волной препятствия [1]. Фотокамерой регистрировалось интегральное по времени свечение разряда, электронно-оптической камерой – с наносекундным разрешением.

В результате высокоскоростного теневого зондирования были обнаружены особенности ударно-волновой конфигурации: на теневом изображении (рис. 1, а) за фронтом ударной волны виден косой скачок уплотнения, который взаимодействует с ней, искривляя фронт. Свечение разряда с резкой границей слева визуализирует область протекания тока разряда перед фронтом (рис. 1, б). Фотоизображения свечения показывают четкое соответствие формы фронта дифрагированной ударной волны теневым кадрам. Результаты исследования показали, как при удалении от препятствия фронт ударной волны эволюционирует к плоскости, соответствуя [2]. Распределение свечения разряда обеспечивает практически мгновенную визуализацию структуры потока, поскольку экспозиция (время свечения разряда) составляет менее 1 мкс. За время экспозиции смещение элементов течения не превышает доли миллиметра, позволяя с большой точностью определить положение и форму фронта ударной волны после дифракции.

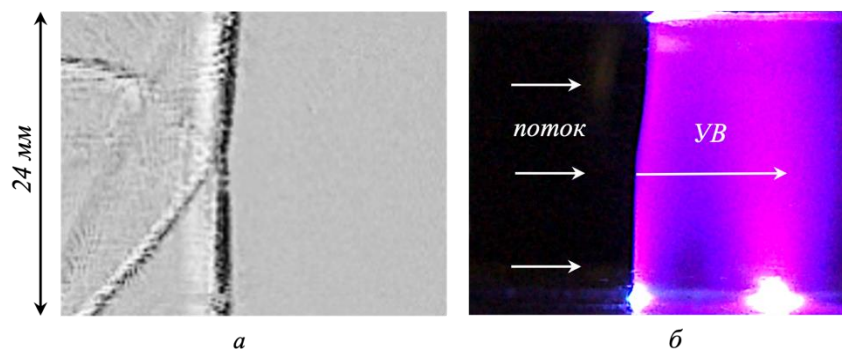


Рис. 1. а) теневое изображение ударной волны; б) фотоизображение свечения разряда в присутствии фронта ударной волны (УВ). Фронт ударной волны на расстоянии 45 мм за препятствием ($M=3,0$, $p_0 = 25$ Торр).

Исследование выполнено в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина. Проект 001986».

1. Иванова А.А., Мурсенкова И.В. Экспериментальное исследование движения ударной волны в плазме импульсного объемного разряда в воздухе // Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия. 2023. № 2. 2320601.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1988. 737 с.

МОДИФИКАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА В ПОТОКЕ ГАЗА ВБЛИЗИ ТВЕРДЫХ Тел РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Иванов О.О.¹, Веденеев В.В.¹

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

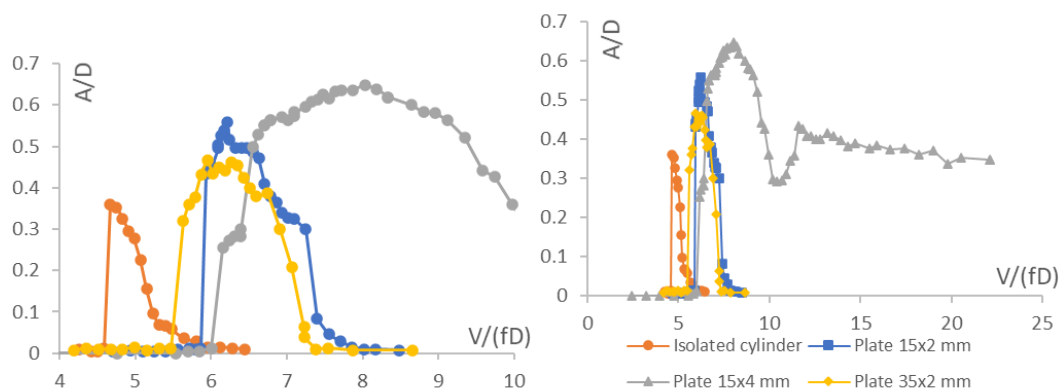
При движении жидкости или газа около плохо обтекаемых тел в широком диапазоне чисел Рейнольдса наблюдается процесс периодического схода вихрей за телом, что приводит к действию периодической силы на тело. Для упругих конструкций при сближении одной из собственных частот с частотой схода вихрей возникает резонанс, при котором амплитуда колебаний может быть значительна [1, 2], и что, в свою очередь, может приводить к неприятным условиям эксплуатации различных конструкций, вплоть до их разрушения. В то же время такие колебания могут быть использованы для отбора механической энергии из потока и преобразования ее в электрическую.

В данной работе изучается изменение характеристик резонансных колебаний упругого цилиндра при постановке рядом с ним твердых тел. Ранее было получено [3], что при постановке пластины обтекаемой формы с размерами 35x2 мм можно добиться увеличения амплитуды колебаний до 39% по сравнению с одиночным цилиндром. Поэтому вызывает интерес провести эксперименты с твердыми телами другой формы. В качестве таковых были взяты пластины с прямоугольным сечением 15x2 мм и 15x4 мм, эллиптический профиль с осями 64x8 мм, а также профиль симметричного крыла NASA0016 с хордой 60 мм.

Была проведена серия экспериментов в аэродинамической трубе для конфигураций «Цилиндр+пластина» с измерением амплитуды колебаний цилиндра диаметром $D=6$ мм и частотой собственных колебаний $f=15.3$ Гц. Для пластины 15x2 мм было получено увеличение амплитуды до 55% и существенное смещение диапазона резонансных колебаний (т.н. диапазона синхронизации) в сторону больших скоростей. Для пластины 15x4 мм получено наибольшее усиление колебаний до ~80%, а также в рамках эксперимента конец области колебаний не был обнаружен.

Колебания цилиндра при постановке крылового профиля NASA0016 увеличивались незначительно (1.3%), в то время как для эллиптического профиля увеличение максимальной амплитуды составило 32.5% с серьезным увеличением диапазона синхронизации.

Было показано важность учета угла набегания потока на ветроустановку: при малых углах атаки для эллиптического профиля было зафиксировано увеличение эффективности, однако при дальнейшем росте углов эффективность значительно упала.



Амплитуда колебаний A/D одиночного (isolated cylinder) цилиндра и вблизи твердых пластин (plate). Слева – в малом масштабе по скорости потока, справа – в большом.

1. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник // Судостроение. 1983. Т. 331.
2. Williamson C.H.K., Govardhan R. Vortex induced vibrations // Annu. Rev. Fluid Mech. 2004. 36. P. 413-455.
3. Ivanov O., Vedeneev V. Vortex-induced vibrations of an elastic cylinder near a finite-length plate // Journal of Fluids and Structures. 2021. V. 107. P. 103393.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Каменских А.А.¹, Крысина А.С.¹, Панькова А.П.¹

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

Характер обработки поверхностей сопряжения может оказывать значительное влияние на параметры контакта и напряженно-деформированного состояния объектов исследования [1]. При этом оценка влияния качества обработки поверхности при сопряжении с защитными покрытиями и прослойками на поведение узлов трения в целом является актуальным направлением исследования [2]. В данной работе рассмотрено влияния характера сопряжения защитного полимерного слоя из модифицированного γ -излучением фторопласта с металлической поверхностью в рамках модельной задачи и в модели реальной конструкции сферической опорной части [3]. Основное внимание было уделено области контакта с индентором, в качестве примера на рисунке показано распределение параметров контакта на поверхности индентор-прослойка при трех вариантах сопряжения (идеальный контакт, полная адгезия, фрикционный контакт) на границе контакта прослойки с целевой металлической поверхностью.

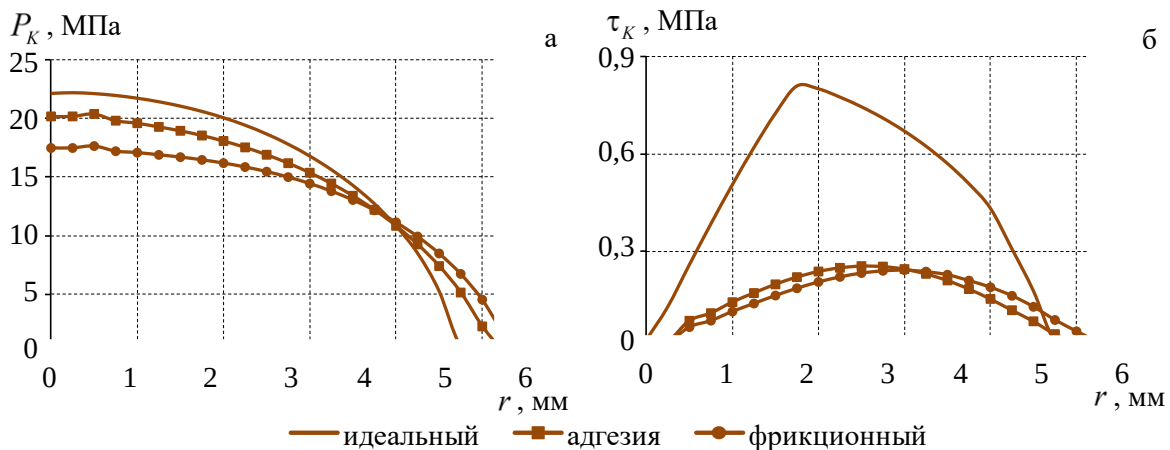


Рис. Параметры контакта на границе сопряжения индентор-прослойка при разном характере сопряжения прослойки с металлической поверхностью:
а) контактное давление; б) контактное касательное напряжение.

В рамках работы выполнено исследование влияния толщины защитного слоя от 4 до 12 мм на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) прослойки и контакта при разном характере ее сопряжения с целевой поверхностью. В целом установлено снижение параметров при увеличении толщины, наблюдается значительное влияние фрикционного контакта на границе полимер-сталь на характер распределения интенсивности напряжений и деформаций. Рассмотрено влияния порядка аппроксимации элементов на численное решение задачи. Выполнен переход к анализу НДС и контакта на модели сферической опорной части Л-100 производства ООО «АльфаТех» г. Пермь.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-01313.

1. Макаров В.Ф., Муратов К.Р. Анализ оборудования для финишной абразивной обработки плоских поверхностей // Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 1. С. 170–187.
2. Wang H., Sun A., Qi X., Dong Y., Fan B. Experimental and Analytical Investigations on Tribological Properties of PTFE // AP Composites. Polymers. 2021. Vol. 13. №24. Art. 4295.
3. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifriction layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // Lubricants. 2022. V. 10. N. 2. Art. 30.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЭЛЕКТРОДА

Каменских А.А.¹, Горохов А.Ю.¹, Кузнецова Ю.С.¹, Абляз Т.Р.¹, Муратов К.Р.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Международное научное сообщество отмечает актуальность исследований, направленных на рационализацию и оптимизацию технологии электроэрозионной обработки материалов [1, 2]. Большой процент работ связан с анализом влияния обрабатываемых материалов, электродов и диэлектрической среды на готовое изделие или морфологию обрабатываемой поверхности. Отмечается, что современные попытки математического описания технологии в рамках аналитических и численных методов не рассматривают износ инструмента, что вносит в модели значительную погрешность, и не позволяют качественно описать процесс для дальнейшей оптимизации рабочих режимов [1, 2]. При этом согласно Постановлению Правительства РФ № 603 от 15 апреля 2023 г. «Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики Российской Федерации» развитие технологий обработки материалов и создание специализированных программных продуктов для описания процессов являются актуальными направлениями развития страны. В представленной работе рассмотрено исследование процесса импульсного электрофизического воздействия высококонцентрируемого источника электрической энергии на обрабатываемую поверхность в рамках прикладной механики и компьютерного инжиниринга с учетом износа электрода (Рис.).

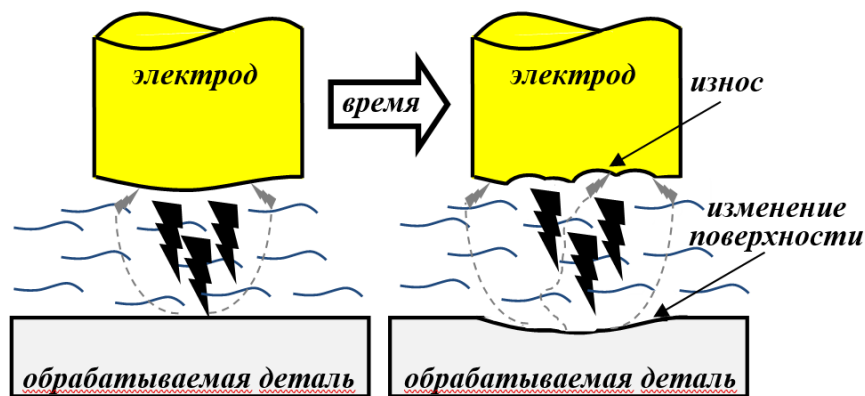


Рис. Электроэрозионная обработка материалов.

На базе центра коллективного пользования «Центр аддитивных технологий» ПНИПУ (г. Пермь) выполнен большой объем эмпирических исследований по электроэрозионной обработке поверхностей металлических и композиционных материалов [3, 4]. В рамках работы выполнена математическая оценка влияния учета износа электрода-инструмента с использованием методов многопараметрической оптимизации для рационализации режимов работы оборудования. Выполнена серия натурных экспериментов для фиксации характера изменения (износа) как электрода, так и обрабатываемой поверхности, которая легла в основу математического описания процесса электроэрозионной обработки в рамках первого приближения для канонической формы электрода.

Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

1. Nafi M.A., Jahan M.P. Functional Surface Generation by EDM – A Review // *Micromachines*. 2023. Vol. 14. Art. 115.

2. Mullya S.A., Karthikeyan G., Ganachari V.S. Electric discharge milling: a state-of-the-art review // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. V. 43. Art. 424.

3. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Zhurin A.V. Study of the EDM process of bimetallic materials using a composite electrode tool // *Materials*. 2022. V. 15. N. 3. Art. 750.

4. Singh T., Dvivedi A., Sidhu S.S., Shlykov E.S., Muratov K.R., Ablyaz T.R. Energy Channelization Analysis of Rough Tools Developed by RM-MT-EDM Process during ECSM of Glass Substrates // *Materials*. 2022. V. 15. N. 16. Art. 5598.

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНА ТИПА PANDA НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОВАРИАНТНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Каменских А.А.¹, Лесникова Ю.И.¹, Стражец Ю.А.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Исследования, связанные с анализом свойств материалов, из которых изготавливаются оптические волокна, и учет в численных аналогах объектов исследования их неупругого поведения актуально и позволяет получить новые данные и закономерности о работе узла, приближенные к реальным показателям конструкции [1, 2]. Интересен вопрос не только влияния остаточных напряжений, полученных в волокне после вытяжки и остывания (Рис.), на распределение и уровень которых влияют модели поведения стекла с различными легирующими добавками, но и изменение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и оптики при действии на волокно различных нагрузок: сжатие, изгиб, натяг и т.д. В работе рассмотрен один из вариантов нагрузок, который представляет интерес для анализа работы волокна типа Panda [3]: взаимодействие волокна с металлической поверхностью при индентировании. Модель волокна при индентировании включала двухслойное полимерное защитное покрытие.

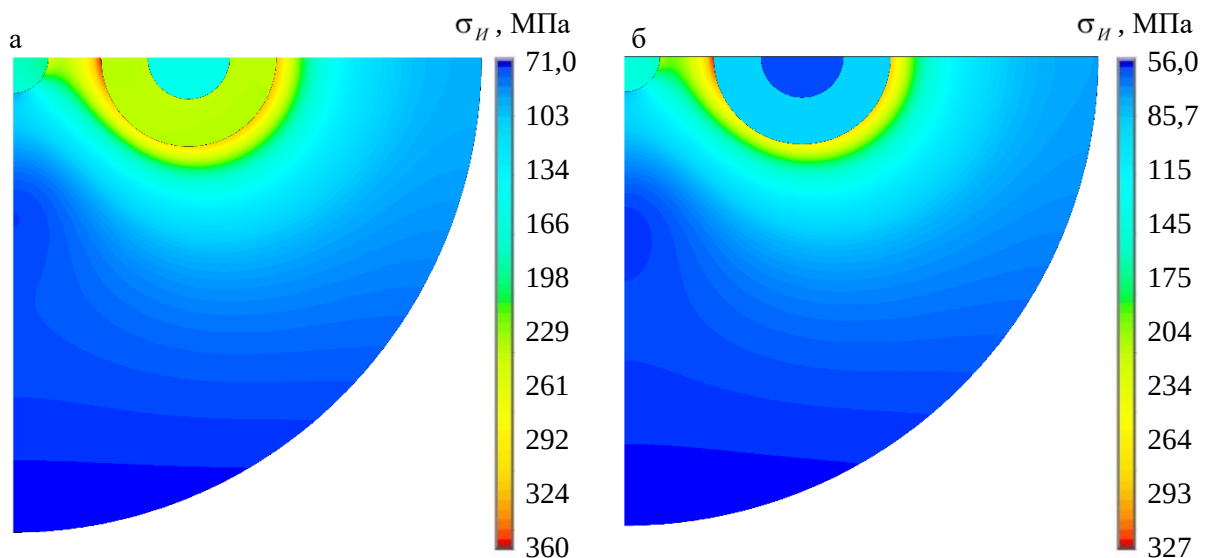


Рис. Характер распределение σ_{II} : а) термоупругость; б) термовязкоупругость.

В рамках работы исследовано влияние термомеханических моделей поведения стекол при моделировании поля остаточных технологических напряжений. Выполнена оценка учета вязкости полимерных материалов защитного покрытия, полученных экспериментально [3], на деформировании системы в целом и изменение оптических параметров при индентировании в широком диапазоне нагрузок. Рассмотрено влияние трения между волокном и металлической поверхностью на изменение параметров НДС, контакта и оптики.

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

1. Lesnikova Y.I., Trufanov A.N., Kamenskikh A.A. Analysis of the Polymer Two-Layer Protective Coating Impact on Panda-Type Optical Fiber under Bending // *Polymers*. 2022. V. 14. N. 18. Art. 3840.
2. Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the Temperature Dependence of the Thermal Expansion Coefficient of Polymers // *Polymers*. 2021. V. 13. N. 18. Art. 3035.
3. Хлыбов А.В. Волоконно-оптические поляриметрические датчики физических величин: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Санкт-Петербург, 2004. 215 с.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ И ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТЕНКИ КАНАЛА

Карнозова Е.А.¹, Знаменская И.А.¹

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

e-mail: karnozova.ea16@physics.msu

В настоящее время необходимость получения данных для прогнозирования нагрева поверхностей летательных аппаратов, движущихся с высокими скоростями в условиях неравновесного тепло- и массообмена, является актуальной задачей. Исследуются различные механизмы подвода энергии, в том числе, с малыми характерными временами (менее характерных времен теплопроводности): нагрев стенок тепловыми потоками при ударно-волновых процессах и внешний подвод тепла при иницировании плазмы импульсного разряда.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований тепловых полей от стенок канала разрядной секции ударной трубы по мере эволюции нестационарного газодинамического потока в канале. На нижней стенке канала установлено прямоугольное препятствие (между боковыми окнами), влияющее на картину поля течения и на перераспределение плазмы иницируемого в набегающем потоке разряда. Через ИК-прозрачные боковые стенки разрядной секции ведется термографическая и теневая высокоскоростная покадровая визуализация сверхзвукового и транзвукового потока в прямоугольном канале с профилированной нижней стенкой, а также газодинамических и тепловых процессов, связанных с иницированием импульсного наносекундного поверхностного разряда.

Получены данные теневой высокоскоростной покадровой съемки дифракции падающей ударной волны, установления сверхзвукового обтекания прямоугольного препятствия на нижней стенке канала, эволюции возникающей в результате иницирования разряда ударной волны, распространяющейся от области локализации плазмы. Проведено сравнение с тепловыми полями, формирующимися в результате взаимодействия набегающего высокоскоростного потока со стенками канала (газодинамический нагрев) и импульсного плазменного нагрева.

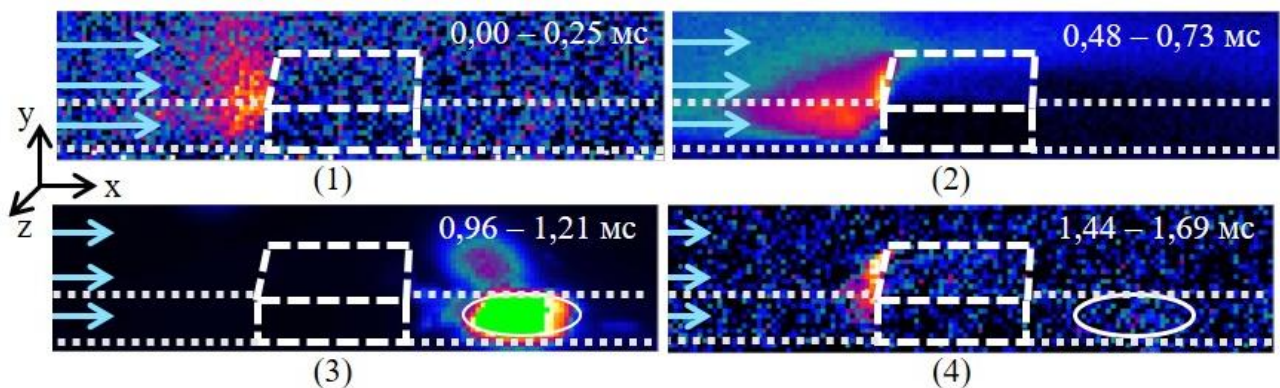


Рис. 1. Покадровая инфракрасная съемка: длительный газодинамический нагрев стенок в наветренной зоне (1-4) и интенсивное тепловое излучение от нагретой плазмой области (3).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-19-0096.

1. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Карнозова Е.А., Кули-Заде Т.А. Динамика тепловых потоков нагретой импульсным сильноточным разрядом области канала // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61. № 1. <https://www.mathnet.ru/rus/tvt11743>
2. Znamenskaya I.A., Karnozova E.A., Kuli-zade T.A. The Discharge Heated Channel Region Visualization Based on Thermal Imaging Registration // Science Visualization. 2022. V. 14. N. 4. P. 52–61.
3. Tatarenkova D.I., Koroteeva E.Yu, Kuli-zade T.A., Karnozova E.A., Znamenskaya I.A., Sysoev N.N. Pulsed discharge-induced high-speed flow near a dielectric ledge // Experiments in Fluids. 2021. V. 62. N. 7. P. 151.

КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МОДЕЛИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ДАРЬЕ

Курсанова А.С.

Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара
e-mail: askirsanova99@gmail.com

В последние десятилетия актуальность использования возобновляемых источников энергии стала предметом всеобщего интереса и обсуждения. Спрос на электроэнергию растет с каждым годом во всем мире, и существует острая необходимость в источниках энергии, которые были бы надежными, доступными и экологически чистыми. Ветроэнергетика предлагает решение этой проблемы, поскольку ветровые турбины способны генерировать электроэнергию с помощью силы ветра, которая является неисчерпаемым ресурсом. Ветроэнергетика имеет множество преимуществ, таких как отсутствие выбросов парниковых газов и низкие эксплуатационные затраты.



Ветрогенератор Дарье.

В данной работе рассматривается математическая модель малого ветрогенератора Дарье в виде системы дифференциальных уравнений. Производится кусочно-линейная аппроксимация аэродинамического момента. При этом, если задается более точная аппроксимация аэродинамического момента, то это практически никак не влияет на качественное поведение решений дифференциальной системы. В результате установлены условия существования релаксационных колебаний и явления «уточный взрыв», которое характеризуется резким увеличением амплитуды колебаний при практически неизменном значении параметров.

Релаксационные колебания – это периодические решения дифференциальных уравнений, траектории которых проходят вдоль устойчивых участков медленной кривой, перескакивая с одного участка на другой после точки срыва, а траектория-утка сначала проходит вдоль устойчивого участка медленной кривой, а затем вдоль неустойчивого участка, причем оба раза проходятся расстояния порядка единицы [4].

Автор глубоко признателен профессору Кобрину А.И. за постановку задачи и ценные советы.

1. Курсанова А.С. Бифуркации стационарных режимов в модели ветроэнергетической установки // Вестн. СамУ. Естественнаучн. сер. 2021. Т. 27. № 4. С.92–98.
2. Досаев М.З., Линь Ч.Х., Лю В.Л., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д. Качественный анализ стационарных режимов малых ветровых электростанций // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. № 3. С. 368–374.
3. Кобрин А.И. Конструктивная теория МВЭУ. Часть I (главы I-II) / А.И. Кобрин, М.З. Досаев, Б.Я. Локшин, В.А. Самсонов, С.Ю. Селюцкий. М.: Изд-во Московского Университета, 2007. 76 с.
4. Соболев В.А. Редукция моделей и критические явления в макрокинетике / В.А. Соболев, Е.А. Щепаккина. М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. 320 с.

КВАЗИГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ И ЕГО ТЕСТИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ТЕПЛОВОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ

Кирюшина М.А.¹

¹ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва

e-mail: m_ist@mail.ru

Одним из методов численного моделирования задач гидродинамики является использование квазигидродинамических (КГиД) уравнений, которые являются обобщением уравнений Навье-Стокса. Квазигидродинамический алгоритм также, как и квазигазодинамический (КГД), был имплементирован в открытый программный комплекс OpenFOAM [1-3].

КГиД система для описания течений вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости в приближении Буссинеска имеет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\vec{u} - \vec{w}) &= 0, \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \operatorname{div}((\vec{u} - \vec{w}) \otimes \vec{u}) + \frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} p &= \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \Pi - \beta \vec{g}(T - T_0), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{u} T) &= \operatorname{div}(\vec{w} T) + \chi \Delta T + \operatorname{div}(\tau \vec{u} (\vec{u} \cdot \vec{\nabla} T)). \end{aligned}$$

Было проведено тестирование режимов при различных числах Грасгофа от 10^4 до $2 \cdot 10^8$ в задаче тепловой конвекции в квадратной области с помощью солвера mulesQHDFoam открытого пакета OpenFOAM. Расчетная область и результаты расчетов приведены на Рис. 1. Получено, что стационарное течение реализуется вплоть до чисел Грасгофа 10^8 . При дальнейшем увеличении числа Грасгофа до $2 \cdot 10^8$ течение в области становится нестационарным.

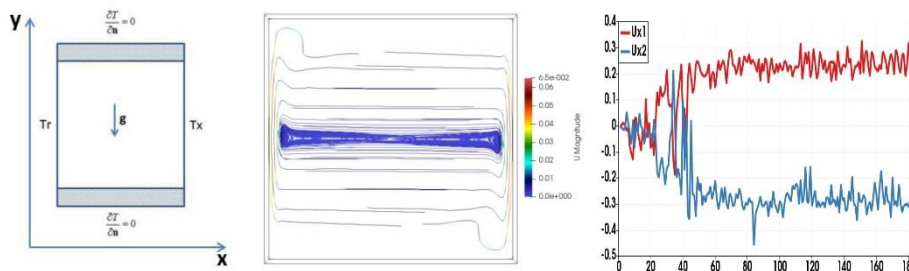


Рис. 1. Квадратная расчетная область: слева горячая стенка с температурой T_h , справа – холодная с температурой T_c (слева). Стационарный режим: линии тока для значений модуля скорости для $Gr=10^8$ (посередине). Нестационарный режим течения для $Gr=2 \cdot 10^8$. Распределения в точках с координатами (0.08075 0.0) и (0.08075 0.24225 0.0). Сетка 160x160 (справа).

Тестирование КГиД алгоритма и сравнение полученных результатов с имеющимися расчетами показывает адекватность применения метода к задачам тепловой конвекции с высокими числами Грасгофа. В рамках КГиД алгоритма был проведен расчет задачи метода Чохральского в полной трехмерной постановке с реальными размерами тигля и расплавом вещества [4].

Работа выполнена при поддержке Московского центра фундаментальной и прикладной математик и, Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2022-283.

1. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. М.: Научный мир. 2007.

2. Kraposhin M.V., Ryazanov D.A., Smirnova E.V., Elizarova T.G., Kiryushina (Istomina) M.A. // 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).

3. Kraposhin M.V., Ryazanov D.A., Elizarova T.G. Numerical algorithm based on regularized equations for incompressible flow modeling and its implementation in OpenFOAM // Computer physics Communications. 2022. 271. 108216.

4. Кирюшина М.А., Елизарова Т.Г., Епихин А.С. Моделирование течения расплава в методе Чохральского в рамках открытого пакета OpenFOAM с применением квазигидродинамического алгоритма // Математическое моделирование, 2023 (в печати).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕНАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

Клюев Н.А.¹, Жданова Н.С.¹, Васильев О.В.^{1,2}

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

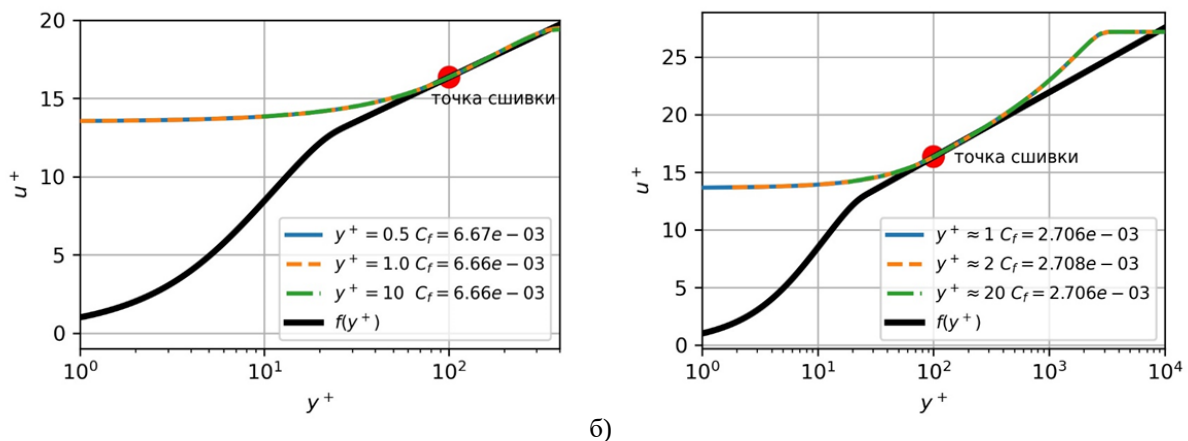
² Сколковский институт науки и технологий, Москва

e-mail: nik_kluev@mail.ru

Время расчёта течений с большими числами Рейнольдса, несмотря на развитие вычислительной техники, всё ещё остаётся существенным из-за повышенного требования к разрешению пристеночных областей. Ограничение на размер ячеек расчётной сетки вблизи стенок могут быть снижены при использовании методов на основе пристеночных функций.

В работе исследуется новый метод пенализированных пристеночных функций [1] для моделирования пристеночных областей турбулентных течений для численного моделирования вязкого сжимаемого газа с применением уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. В основе метода лежит дифференциальное условие сшивки внешнего решения с пристеночной функцией, которое позволяет использовать обобщение метода характеристических штрафных функций для переноса касательного напряжения из внешней области пограничного слоя на поверхность тела. При этом область сшивки задается неявно в дифференциальном уравнении через локализованный в пограничном слое источниковый член, записанный как функция расстояния от стенки, нормированного на масштаб вязкой длины. Касательное напряжение на стенке, в свою очередь, определяется в процессе численного решения специального дифференциального уравнения, включающего в себя характеристические штрафные функции и аналитический закон стенки. Исследуемый метод заметно снижает требования к пристеночному разрешению расчетной сетки без существенного усложнения вычислительного алгоритма и позволяет полностью устранить плохо-определенное условие точки сшивки решений. Численная реализация подхода проведена с применением вершинно-центрированного метода контрольных объемов и структурированных расчетных сеток.

Применимость исследуемого метода продемонстрирована на примере решения двух тестовых задач: течение в двумерном канале и турбулентное обтекание бесконечно тонкой пластины. Расчёты проводились на структурированных сетках с различным разрешением пристеночной области. Полученные в расчётах с применением метода пенализированных пристеночных функций профили скорости в пограничном слое представлены на рисунке 1.



а) б)
Рисунок 1 – Профили скорости в пристеночной области, полученные в расчётах тестовых задач: турбулентное течение в канале а) и обтекание пластины б). $f(y^+)$ - модифицированный закон Райхарда.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, Проект № 21-71-10100.

1. Васильев О.В., Жданова Н.С. Метод моделирования турбулентного пограничного слоя на основе аналитических законов стенки в формулировке метода характеристических штрафных функций // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2023. Т. 63. № 5. С. 778-794.

МЕТОДЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

Конурин Д.В., Чуйкин Р.А.
АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород
e-mail: d.v.konurin@okbm.nnov.ru

Цель работы заключалась в разработке:

- метода тензометрирования оборудования РУ при повышенных температурах без применения точечной сварки;
- метода динамического тензометрирования.

Во-первых, авторами было проведено исследование влияния температурного воздействия на показания приклеиваемого тензорезистора ZFLA [1]. По результатам первоначальных испытаний тензорезистора была установлена зависимость деформаций тензорезистора от температуры. Показания деформаций значительно превышали его паспортные значения.

Анализируя полученные результаты, было сделано предположение, что значительную часть деформаций от нагрева составляет фиктивная деформация провода тензорезистора вследствие изменения его сопротивления.

Для подтверждения влияния изменения сопротивления провода от температуры на показания тензорезистора было принято решение подключить к усилителю измерительному дополнительный провод в непосредственной близости от провода тензорезистора. После испытания тензорезистора с дополнительным проводом были получены данные, представленные на рисунке 1.

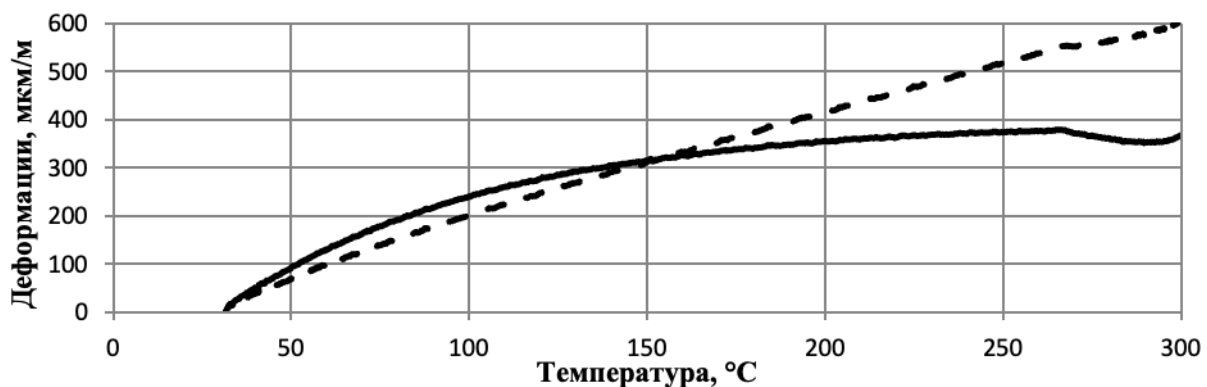


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость деформаций тензорезистора (сплошная линия) и дополнительного провода от температуры (прерывистая линия).

В итоге был сделан вывод, что вместо компенсационного тензорезистора для учета влияния температуры на показания рабочего тензорезистора необходимо и достаточно применять дополнительный дублирующий провод.

Во-вторых, авторами был разработан метод динамического тензометрирования ответственного оборудования РУ с использованием усилителя измерительного MGCplus и измерительно-вычислительного комплекса МИС-400 и выполнены работы по определению амплитудно-частотных характеристик тензорезисторов, установленных с использованием цианокрилатного клея.

Объединив измерительно-вычислительный комплекс МИС-400 и усилитель измерительный MGCplus, появилась возможность регистрировать измерительный сигнал с частотой дискретизации 0-7200 Гц с полосой пропускания 0-3600 Гц, что позволило производить динамическое тензометрирование объектов контроля измерительно-вычислительным комплексом МИС-400 без измерительной платы, предназначенной для измерений быстропротекающих процессов.

1. Конурин Д.В., Пичков С.Н., Шишулин Д.Н. Оценка влияния температурного воздействия на показания приклеиваемых тензорезисторов для испытаний при 300°C // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. Т. 110. № 3. С. 214-218.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Копылов А.Я.¹, Знаменская И.А.¹

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: kopylov.ai19@physics.msu.ru

Одной из важнейших задач современной аэромеханики является предсказание и управление ламинарно-турбулентным переходом в пограничных слоях, в основном - с целью увеличения длины области ламинарного течения в нем. Целью данной работы являлось изучение эволюции пограничного слоя в течении газа за фронтом плоской ударной волны в рабочей камере ударной трубы. Исследовался спутный поток за плоской ударной волной на временном интервале от 0 до 10 мс для чисел Маха 2 - 4,2. Для визуализации участков ламинарного и турбулентного пограничного слоя используется теневая схема с лазерной подсветкой, регистрировалась вторая производная плотности газа. Съемка велась высокоскоростной цифровой камерой (скорость съемки 100000-420000 к/с). Луч лазера с помощью системы линз формировался в параллельный пучок света, который проходил через объект исследования и сводился объективом камеры на ее матрицу. Получены теневые анимации течения с областью ламинарно-турбулентного перехода в оптически тонком пограничном слое.

Визуализированы полосчатые структуры в сверхзвуковом пограничном слое на стекле рабочей камеры. Исследованы количественные характеристики пограничного слоя и полосчатых структур; определены размеры ламинарной, турбулентной, переходной областей; ширина, скорость развития полосчатых структур. Проведена обработка изображений. Исследованы спектры пульсаций интенсивности в турбулентном течении.

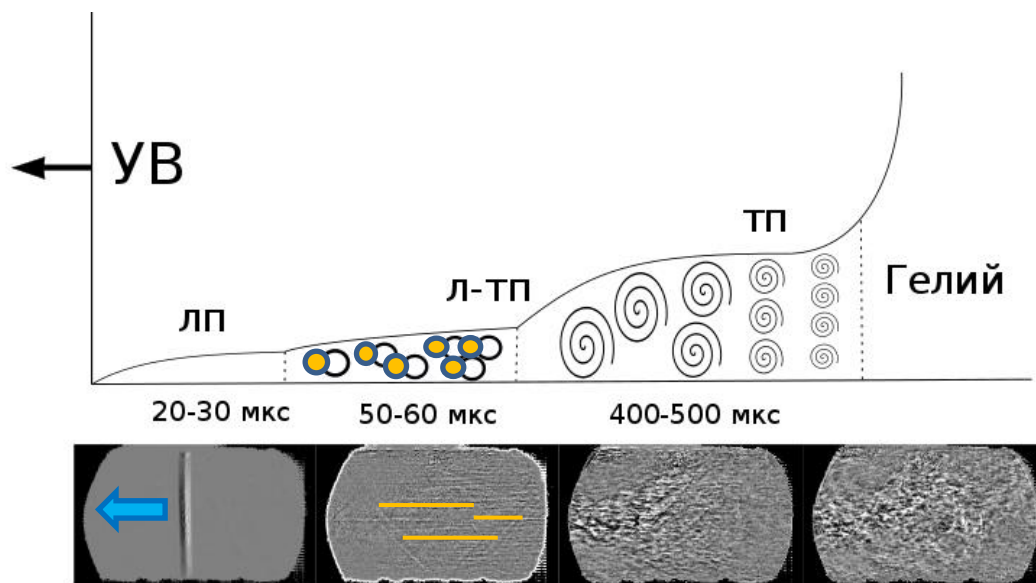


Рис. Эволюция пограничного слоя на стекле после прохода ударной волны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-19-0096.

1. Знаменская И.А., Кули-заде Т. А., Долбня Д.И., Копылов А.Я. "Беззасевные оптические методы трассирования в исследованиях пограничного слоя газа"// Сборник: Труды 17 Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» 2023.

О ДВУХ ПОСТАНОВКАХ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ВЫСОКОЭЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА

Коровайцева Е.А.

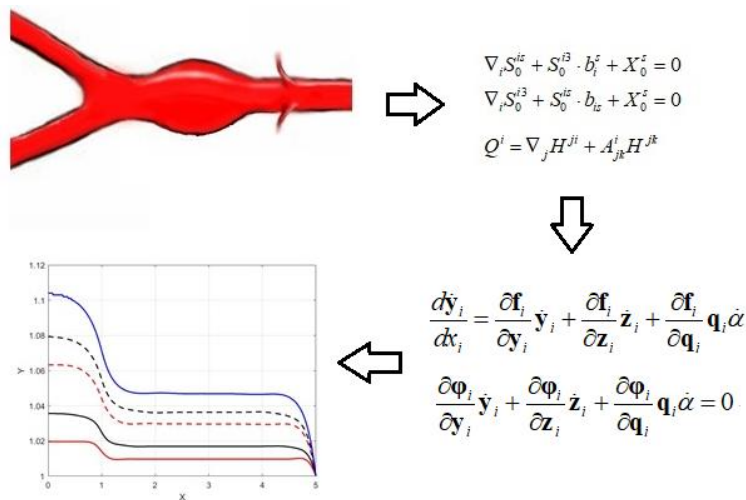
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: katrell@mail.ru

В работе представлено сравнение двух постановок задач динамического деформирования тонких оболочек вращения из высокоэластичных материалов при больших деформациях. Первая основана на традиционно используемой в расчетах мягких оболочек системе разрешающих соотношений безмоментной теории оболочек. Вторая постановка связана с использованием уравнений моментной теории тонких оболочек, основанной на модифицированной модели Кирхгофа-Лява [1]. Особенностью последней является введение в кинематические соотношения поправок, позволяющих учитывать поперечную деформацию оболочки.

Обе системы уравнений сводятся к единой векторно-матричной форме нелинейной начально-краевой задачи с дополнительными нелинейными алгебраическими соотношениями. Универсальность формулировки разрешающих соотношений позволяет проводить расчеты для обеих систем уравнений по единому алгоритму [2]. Исходная нелинейная начально-краевая задача с использованием метода прямых сводится к нелинейной краевой задаче, которая решается методом дифференцирования по параметру последовательно на каждом шаге по времени. В процессе вычислений для оценки качества получаемого решения происходит постоянный контроль обусловленности систем разрешающих уравнений.

В качестве примера рассмотрена задача динамического деформирования цилиндрической оболочки из неогоуковского материала. Показано, что преимуществом использования соотношений, основанной на моментной теории оболочек, является отсутствие необходимости регуляризации соответствующей системы уравнений, а также возможность проведения расчетов с меньшим шагом по времени. Вместе с тем краевые задачи, формируемые в процессе вычислений по соотношениям безмоментной теории оболочек, лучше обусловлены, и проведение расчетов в области больших деформаций сопровождается меньшими вычислительными трудностями.



Моделирование раздувания цилиндрической оболочки из высокоэластичного материала с местным утонением.

1. Паймушин В.Н. Теория тонких оболочек при конечных перемещениях и деформациях, основанная на модифицированной модели Кирхгофа-Лява // Прикладная математика и механика. 2011. Т. 75. Вып.5. С. 813–829.

2. Коровайцева Е.А. Применение метода дифференцирования по параметру в решении нелинейных задач стационарной динамики осесимметричных мягких оболочек // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 25. №3. С. 556– 570.

ТЕЧЕНИЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В МИКРОКАНАЛЕ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

Косьянчук В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: vasiliy_ksnk@mail.ru

Работа посвящена численному исследованию нестационарного течения газа в микроканале, по стенкам которого распространяются поверхностные акустические волны (ПАВ). Предыдущие работы автора показали, что волновое движение границ микроканала может влиять на поток протекающего газа и может быть использовано для разделения газовых смесей [1] или создания газовых микронасосов [2]. В то же время, с развитием микротехнологий популярность и широкое применение приобрели устройства, использующие поверхностные акустические волны (ПАВ), в частности, в микрофлюидике, для прокачки [3] и перемешивания [4] жидкостей (Рис. 1). В связи с этим было решено [5] детальнее изучить течения газов в устройствах, с параметрами, характерными именно для ПАВ – амплитуды волн порядка одного ангстрема, большие отношения длины волны к амплитуде, волновые скорости порядка 1000 м/с.

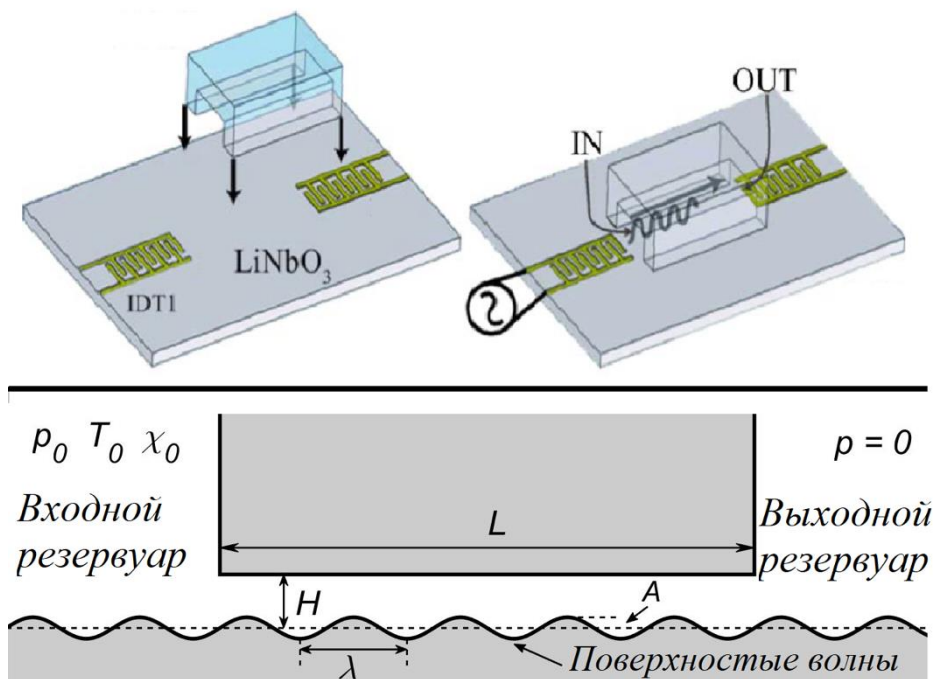


Рис. 1. Сверху – процесс создания микроканалов с ПАВ, снизу – иллюстрация физической постановки.

Исследованы режимы течения при различных степенях разреженности газа, характеризующиеся числом Кнудсена – от свободномолекулярного режима до переходного и около-континуального. Показано, что наличие ПАВ оказывает влияние на течение газа в широком диапазоне чисел Кнудсена. Также показано, что влияние ПАВ растет с увеличением длины канала, с увеличением амплитуды волн, а также с увеличением отношения амплитуды к длине волны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-71-00071.

1. Косьянчук В. В., Якунчиков А. Н. Свободномолекулярное течение газа в канале с изгибающейся границей // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018. №. 3. С. 87-97.
2. Kosyanchuk V. V., Yakunchikov A. N. Simulation of gas separation effect in microchannel with moving walls // Microfluidics and Nanofluidics. 2018. Т. 22. С. 1-8.
3. Zhang N. et al. Powerful acoustogeometric streaming from dynamic geometric nonlinearity // Physical review letters. 2021. Т. 126. №. 16. С. 164502.
4. Zhang J. et al. Bubble-Enhanced Mixing Induced by Standing Surface Acoustic Waves (SSAWs) in Microchannel // Micromachines. 2022. Т. 13. №. 8. С. 1337.
5. Kosyanchuk V. Free-molecular gas flow in microchannels with surface acoustic waves: Effect of mixture separation // Vacuum. 2022. Т. 203. С. 111223.

ОСРЕДНЕНИЕ ПО ВРЕМЕНИ И ПО АНСАМБЛЮ ПРИ РАСЧЕТЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Краснопольский Б.И.¹, Клушин М.Д.^{1,2}, Куликов Ю.М.^{1,3}, Чулюнин А.Ю.¹, Чупров П.А.^{1,4}

¹ НИИ механики МГУ, Москва

² Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

⁴ Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

e-mail: krasnopolsky@imec.msu.ru

Неотъемлемым этапом моделирования турбулентных течений в рамках вихреразрешающих методов является осреднение физических величин. В силу гипотезы об эргодичности, такое осреднение может быть произведено по ансамблю реализаций, по времени, по однородным пространственным направлениям, либо как комбинация перечисленных выше вариантов. Интересным и практически значимым при этом оказывается вопрос точности получаемых средних величин для тех или иных способов осреднения.

На примере одной из классических задач о расчете турбулентного течения в плоском канале, в данной работе проводится сопоставление подходов с осреднением по времени и по ансамблю некоррелированных реализаций турбулентного течения. Рассмотрено несколько критериев оценки скорости сходимости процесса осреднения результатов расчета. На основе теории случайных процессов для них получены теоретические оценки по скорости сходимости в зависимости от величины выборки осреднения.

С помощью вычислительного кода NEK5000 и авторского расчетного кода, основанного на алгоритме [1], проведена серия расчетов, в ходе которых получен набор данных в рамках длительного нестационарного расчета и набор, соответствующий ансамблю некоррелированных реализаций. По итогам обработки полученных данных с использованием алгоритмов бутстрапирования [2] построены расчетные зависимости выбранных критериев оценки скорости сходимости процесса осреднения для двух рассматриваемых сценариев осреднения результатов расчета. Наблюдается качественное и количественное соответствие результатов для двух различных расчетных кодов, а также соответствие теоретическим оценкам (рис. 1). Кривые для осреднения по времени и по ансамблю реализаций демонстрируют одинаковую асимптотику, но имеют определенное смещение, величина которого варьируется для различных осредняемых величин. Это смещение обусловлено наличием конечных корреляционных масштабов при осреднении временного ряда. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать для оценки характерных временных масштабов течения, определяющих скорость сходимости процесса осреднения.

Работа поддержана грантом РНФ 18-71-10075.

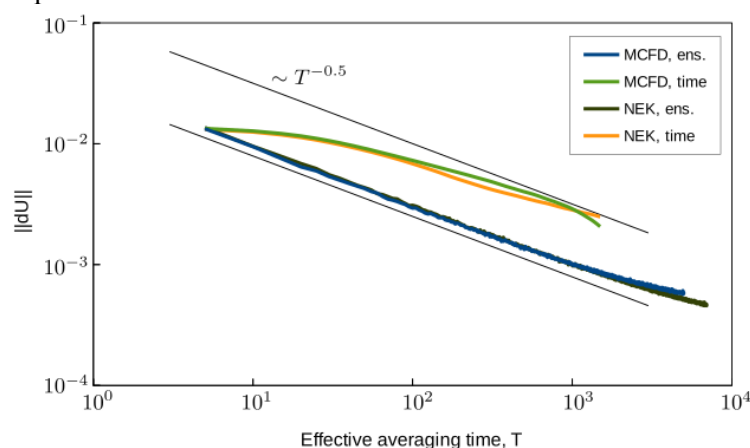


Рисунок 1. Поведение различных критериев осреднения при осреднении по времени и по ансамблю реализаций турбулентного течения в зависимости от эффективного размера выборки осреднения.

1. N. Nikitin, Finite-difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // Journal of Computational Physics. 2006. Т. 217. № 2. С. 759-781.

2. B. Efron. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife // The Annals of Statistics. 1979. Т. 7. № 1. С. 1-26.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСАДКИ ВЕРТОЛЕТА

Кручинин М.М.

АО «НЦВ Миль и Камов», Москва

e-mail: m.kruchinin@nhc.aero

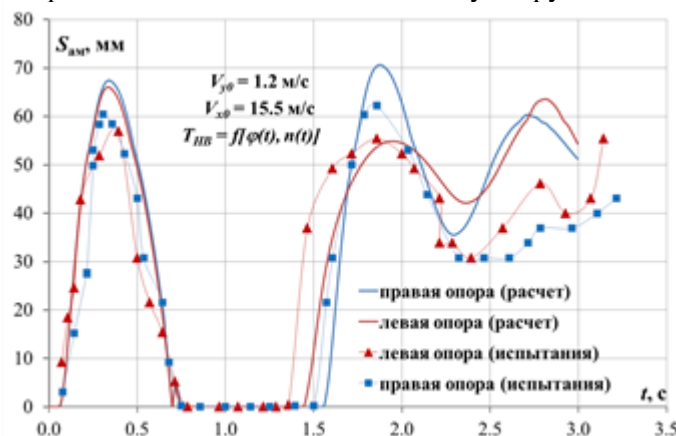
В ходе работ по сертификации вертолета, часто возникают задачи по увеличению взлетной массы вертолета, при этом конструкция планера и шасси не должна меняться. Для подтверждения соответствия существующей конструкции нормам прочности, необходимо проводить комплекс испытаний и расчетов. Одним из таких расчетов является определение внешних нагрузок на шасси и планер в посадочных случаях. При этом условия посадки задаются в соответствии с нормами прочности.

Существующие методы расчета, созданные в 70-х годах прошлого века, не учитывают реальную работу амортизаторов и пневматиков и не принимают в расчет влияние сил трения между пневматиками и поверхностью. Поэтому, построение математической модели посадки вертолета для определения нагрузок на шасси и планер является актуальной задачей.

Данная работа продолжает начатые автором исследования динамических процессов, протекающих при посадке вертолета с помощью математического моделирования [1]. При этом используются созданные ранее модели шасси вертолета Ми-38, уточненные по результатам сертификационных копроовых испытаний.

Копровые испытания позволяют подтвердить эксплуатационные и предельные нагрузки на опоры шасси, однако не дают информации о поведении вертолета в целом при посадке. Для этого необходимо моделирование посадки вертолета. По известным значениям массы, моментов инерции и положения центра масс вертолета Ми-38 в блоке Motion построена габаритно-массовая модель планера вертолета и несущего винта. Подвижные соединения моделировались организацией соответствующих кинематических связей между механизмами шасси и фюзеляжем. Задавая начальные условия и законы управления несущим винтом, рассчитывается движение системы твердых тел под действием внешних сил – это вес вертолета, силы реакции при взаимодействии колес с поверхностью и силовые факторы от несущего винта.

В ходе исследования дана оценка влияния коэффициента трения между пневматиком и поверхностью на работу амортизационной системы и величину нагрузок на шасси.



Сравнение результатов расчета и данных летных испытаний показано на данном графике зависимости обжатия амортизаторов основной опоры по времени. Виден первый посадочный удар, кратковременный отрыв опор от поверхности, второй посадочный удар и пробег вертолета после приземления. Результаты расчета показаны сплошными линиями, данные летного эксперимента – точками. Результаты моделирования достаточно хорошо совпадают с натурными испытаниями, следовательно, модель посадки вертолета можно считать достоверной.

Показаны дальнейшие пути развития и уточнения разработанной методики расчета.

1. Кручинин М. М., Кузьмин Д.А. Математическое моделирование копроовых испытаний шасси вертолета // Труды МАИ. 2017. Выпуск № 92. <https://trudymai.ru/published.php?ID=77093>.

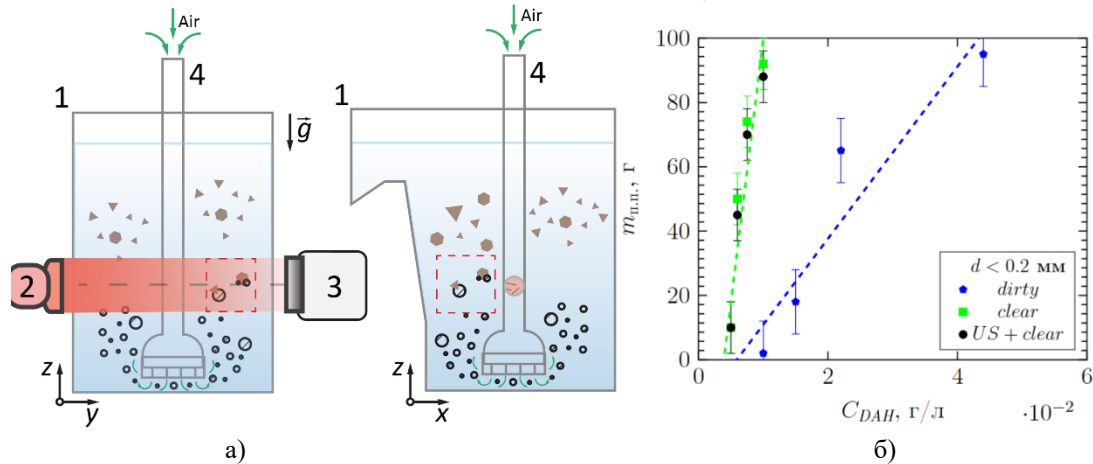
ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

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

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь
e-mail: kat6chinskiy@gmail.com

Высокоочищенные вещества зачастую используются для решения широкого спектра технологических задач. Для их получения могут использоваться различные методы обогащения, к наиболее универсальным относятся флотационные методы [1,2]. К одной из важнейших проблем пенной флотации можно отнести разделения мелких и ультрадисперсных минеральных частиц [3], попадание которых в пенный продукт затруднено из-за низкой вероятности их прикрепления к пузырькам. Решение подобных проблем требует комплексного подхода, поэтому на данном этапе исследователи стараются разбить процесс флотации на подпроцессы и рассмотреть влияние каждого на эффективность обогащения [4]. Одним из способов оптимизации процесса флотации может стать использование ультразвукового (УЗ) воздействия. В работе [5] показано, что УЗ может оказывать значительное влияние на эффективность процесса флотации, а также приводит к возникновению целого ряда эффектов. В настоящей работе экспериментально изучается влияния ультразвукового воздействия на процесс флотации кварца. Для этого была использована флотационная машина ФМП-Л (ВЭКТИС минералз) с источником ультразвука (см. рисунок 1 а).



а) схема установки, б) зависимость массы пенного продукта от концентрации ДАН для мелкой фракции кварца.

Показано, что использование УЗ воздействия для фракции $0.2 < d < 0.5$ мм кварца приводит к увеличению массы пенного продукта. При этом эксперименты, проведенные для фракции $d < 0.2$ мм кварца, продемонстрировали, что УЗ воздействие может отрицательно повлиять на флотационный процесс, подобный эффект также наблюдается применительно и к флотации солей [5]. Кроме того, как показали эксперименты, предварительная очистка руды может качественно улучшить эффективность флотационного процесса, при этом влияние очистки может оказаться в разы выше по сравнению с УЗ воздействием (Рис.1, б). Таким образом, воздействие ультразвука оказывает существенное влияние на обогащение руд с большим содержанием шламовых примесей.

1. Абрамов А. Флотационные методы обогащения. // Litres, 2022.
2. Rodrigues R. T., Rubio J. DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry // International Journal of Mineral Processing. 2007. Т. 82. № 1. С. 1-13.
3. Pattanaik A., Venugopal R. Investigation of adsorption mechanism of reagents (surfactants) system and its applicability in iron ore flotation—An overview // Colloid and Interface Science Communications. 2018. Т. 25. С. 41-65.
4. Zhang Wen, Yuan Qinghe, Jia Shun, Li Zhaojun, and Yin Xianhui // Multi-Objective Optimization of Forth Flotation Process: An Application in Gold Ore. Sustainability. 2021. Т. 13, № 15. С. 8314.
5. Filippov, L. O., Filippova, I. V., Barres, O., Lyubimova, T. P., Fattalov, O. O. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment. // Minerals Engineering. 2021. Т. 171. С. 107092.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ДИСПЕРСИЮ И НЕЛИНЕЙНУЮ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ЛОКАЛИЗАЦИЮ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В МАТЕРИАЛАХ

Леонтьева А.В.

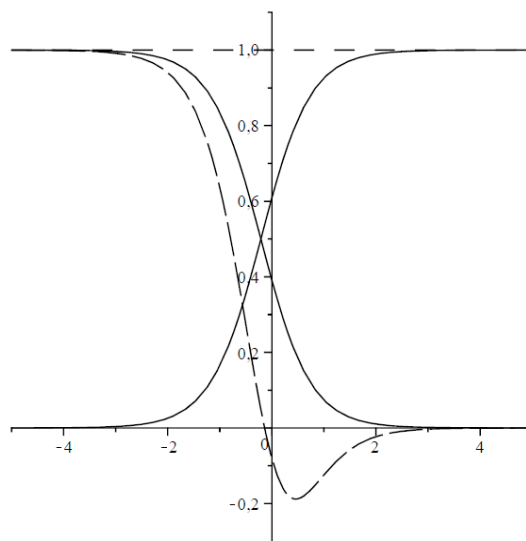
Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФИЦ ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород
e-mail: aleonav@mail.ru

При воздействии на материал лазерного излучения или потока частиц (например, при ионной имплантации) в нем создаются точечные дефекты (вакансии, межузлия) [1]. Прохождение интенсивной продольной акустической волны способствует изменению в областях растяжения и сжатия энергии активации образования точечных дефектов, приводя к их пространственному перераспределению. Дефекты, мигрирующие по материалу, рекомбинируют на различного рода центрах. Роль таких центров могут играть дислокации, примеси внедрения и др.

В [2] показано, что задачу о распространении акустической волны в материале с точечными дефектами следует рассматривать как самосогласованную, включающую в себя, наряду с динамическим уравнением теории упругости, кинетическое уравнение для плотности дефектов.

В [3, 4] исследовано взаимодействие нелинейной волны деформации с полем концентрации точечных дефектов (вакансий, межузлий), приводящее как к рассеянию волны, так и к изменению энергии активации образования дефектов и их пространственному перераспределению. При этом предполагается, что основными процессами, определяющими поведение дефектов, являются процессы генерации, рекомбинации и диффузии, а также учитывается объемная взаимная рекомбинация разноименных дефектов. В [4] совместно с полем концентрации точечных дефектов проанализировано влияние внешнего нестационарного неоднородного температурного поля на нелинейные волны деформации.

В данной работе рассматривается распространение гармонических и нелинейных продольных волн в среде с точечными дефектами. Самосогласованная математическая модель, включающая в себя уравнения теории упругости и кинетические уравнения для плотностей различных типов точечных дефектов, в условиях статической деформации сводится к нелинейному эволюционному уравнению, объединяющему в себе известные уравнения волновой динамики. Показано, что наличие точечных дефектов способствует появлению низкочастотной дисперсии и затухания. Проанализировано влияние параметров системы (коэффициент диффузии дефектов, дилатационный параметр, скорость рекомбинации на стоках) на степень выраженности дисперсии. На рисунке показаны типы нелинейных стационарных волн.



Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00613.

1. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3–32.

2. Мирзоев Ф.Х., Шелепин Л.А. Нелинейные волны деформации и плотности дефектов в металлических пластинах при воздействии внешних потоков энергии // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 8. С. 23–26.

3. Ерофеев В.И., Леонтьева А.В., Мальханов А.О. Влияние дефектов на пространственную локализацию нелинейных акустических волн // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 5. С. 591–596.

4. Ерофеев В.И., Леонтьева А.В., Шекоян А.В. Ударные волны в термоупругой среде с точечными дефектами // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 1. С. 26-32.

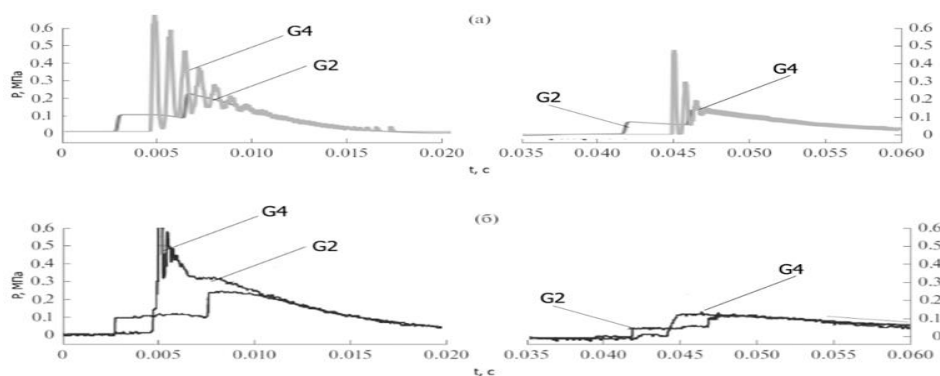
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ГРАНУЛИРОВАННЫМИ ПРЕГРАДАМИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ С УЧЁТОМ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ

Лисицын А.А.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
email: ntvbrrrr@mail.ru

В данной работе численными методами исследуются вопросы взаимодействия ударных волн с деформируемым гранулированным (песчаным) слоем при его сжатии и разгрузке. Результаты численных исследований сравниваются с экспериментальными данными [1]. Численная модель доработана с учётом искусственной вязкости. Для описания поведения грунта и газа используется схема Годунова, модифицированная в [2]. Грунт предполагается необратимо-деформируемой средой. Одномерная расчётная область состоит из двух подобластей: воздуха и песка. Рассмотрению подлежали случаи с отсутствующим песчаным слоем, слоем, размещённым вплотную и слоем, размещённым на некотором расстоянии от границы. Ударная труба [1] состояла из последовательно соединённых камеры высокого давления (КВД) длиной 1 м и камеры низкого давления (КНД) общей длиной 6.9 м. Между КВД и КНД находилась диафрагма, разрушающаяся в начальный момент времени. После разрушения диафрагмы и распада разрыва образуется ударная волна, распространяющаяся вправо в КНД и волна разрежения, распространяющаяся влево в область КВД, которая после отражения от левого торца ударной трубы догоняет фронт изначально распространяющейся вправо плоской ударной волны, формируя ударную волну с падающими параметрами за её фронтом. В боковой стенке КНД и на торце были установлены датчики давления G2 и G4. Сравнение результатов происходило с замеренными экспериментальными данными [1].

Осциллограммы давления в грунте полученные численно (сверху) и экспериментально (снизу)



Результаты численного моделирования газодинамических процессов и процессов сжатия песчаных слоев, опирающихся на торец камеры, в целом, соответствуют экспериментальным данным [1]. Для описания процессов разрушения и разлета гранулированной преграды требуется модификация используемых математических и численных моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке, РНФ проект №22-79-10076 и программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

1. Мирова О. А., Баженова Т. В., Голуб В. В., Влияние экрана из гранулированного материала на многократное отражение плоской ударной волны внутри замкнутого объема // ТВТ. 2020. Т. 58. выпуск 1. С. 144–147.

2. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53. №3 (313). С. 11-19.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ

Лобанов П.Д., Светоносов А.И.

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Для верификации расчетных методов, основанных на современных подходах, в том числе развития методологии создания эффективных RANS-моделей при помощи методов машинного обучения, требуются экспериментальные данные, полученные с использованием различных теплоносителей.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование в достаточно простой геометрии, состоящей из трех вертикальных имитаторов твэлов диаметром 10 мм, расположенных в линию с относительным шагом 1.4. Длина имитаторов твэлов 500 мм. Фотография рабочего участка приведена на рисунке. Использование простой геометрии позволяет, с одной стороны, применять различные методы экспериментальных исследований, включая панорамные высокоскоростные оптические методы [1] и скоростную тепловизионную съемку, с другой стороны, использовать методы прямого численного моделирования или вихреразрушающие методы без существенных вычислительных затрат [2].

Экспериментальная модель оснащена необходимыми системами измерения для температурных полей с помощью тепловизионной съемки и термопарных зондов. При течении теплоносителя может задаваться его расход и температура. Эксперименты проводятся в турбулентном режиме течения теплоносителя при числе Рейнольдса потока, определенном по гидравлическому диаметру, $Re=10000$. Имитаторы твэлов оснащены индивидуальными нагревателями, что позволяет проводить исследования при неравномерном тепловыделении в соседних ячейках. Это позволит определить некоторые закономерности межканального обмена с помощью отслеживания распределения температуры в потоке.

Планируется использование полученных экспериментальных данных для создания эффективных численных моделей для описания турбулентного течения теплоносителя при низких числах Прандтля на основе методов машинного обучения.



Фотография рабочего участка.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-19-00587.

1. Шестаков М.В., Токарев М.П. Исследование гидродинамической структуры течения в упрощенной модели периферийной ячейки ТВС // Издается в авторской редакции, XXXVIII «Сибирский теплофизический семинар, посвященный 65-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». 29-31 августа 2022, Новосибирск, Россия: Тезисы докладов. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2022. – С. 271.

2. Иващенко В.А., Лобанов П.Д., Яворский Н.И., Токарев М.П., Мулладжанов Р.И. Прямое численное моделирование периферийной и внутренней конфигураций модельной сборки ТВЭЛов // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 94.

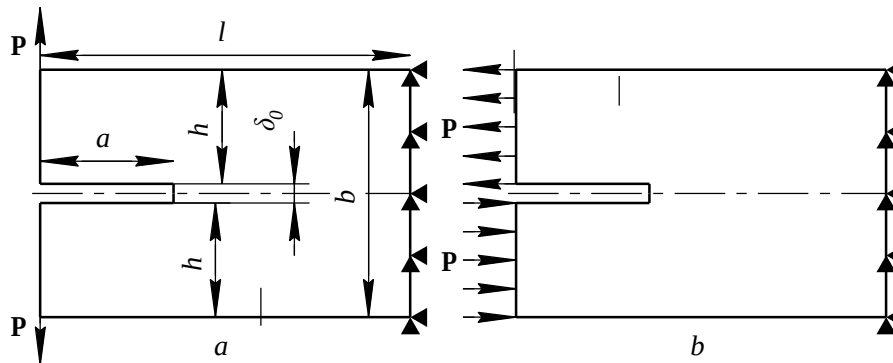
К НАХОЖДЕНИЮ ПОТОКА УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ВЕРШИНУ ФИЗИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА И РАБОТЫ УЗЛОВЫХ СИЛ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТУПИКОВОГО ЭЛЕМЕНТА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО КОНТИНУУМА

Лутхов А.И., Глаголев Л.В.

Тульский государственный университет, Тула

e-mail: tip460@mail.ru

Рассматривается конечно-элементный континуум с физическим разрезом в линейно упругой среде. Линейный параметр задачи определяется толщиной физического разреза и размером грани квадратного конечного элемента в тупиковой области физического разреза. Энергетическое произведение линейного параметра и среднего значения удельной свободной энергии на тупиковой грани конечного элемента определяет значение J-интеграла [1–2]. В программном комплексе ANSYS найдены значения коэффициентов интенсивностей напряжений, по которым найдены эталонные значения J-интегралов, при нулевом значении линейного параметра. На рисунке показаны рассматриваемые схемы нагружения ДКБ-образца по модам I и II. При малом, но конечном значении линейного параметра, установлена сходимость энергетического произведения к эталонным значениям J-интегралов при эквивалентном нагружении образцов с физическим разрезом и стремлении значения линейного параметра к нулю.



Модель ДКБ-образца: a — нагрузка, формирующая нормальный разрыв тупикового элемента;
 b — нагрузка, формирующая поперечный сдвиг тупикового элемента.

Также в работе исследовалась работа узловых сил при разрушении тупикового конечного элемента. Согласно теории Гриффитса, поток упругой энергии определяет поверхностную энергию образования новых материальных поверхностей. Найдено значение соответствующей энергии посредством моделирования разрушения тупикового конечного элемента, при этом моделирование разрушения рассмотрено в виде простой разгрузки его узловых сил, взаимодействующих с сопряженными элементами. Установлена сходимость удельной работы разрушения элемента к значению эталонного J-интеграла.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-00003, <https://rscf.ru/project/22-71-00003/> в Тульском государственном университете.

1. Бурцев А.Ю., Глаголев В.В., Лутхов А.И. К моделированию потоков упругой энергии в вершину трещиноподобного дефекта конечно-элементного континуума при нагружении типа моды I // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. Механика деформируемого твердого тела. 2022. С. 985–990.
2. Лутхов А.И. К моделированию потоков упругой энергии в вершину трещиноподобного дефекта конечно-элементного континуума при нагружении типа моды II // Вестник Тульского государственного университета. Серия: дифференциальные уравнения и прикладные задачи. 2022. № 1. С. 61–71.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ЧИСЛА ШМИДТА И ПРАНДТЛЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА СТЕНКЕ С ЗАВЕСНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРИ ВДУВЕ ИНОРОДНОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ВСТАВКУ

Макарова М.С., Лущик В.Г., Попович С.С.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: makarova@imec.msu.ru

С использованием трехпараметрической RANS-модели турбулентности, дополненной уравнениями переноса для турбулентных потоков тепла и массы, проведено численное исследование пограничного слоя на стенке с завесным охлаждением через пористую вставку при вдуве гелия в поток ксенона [1,2]. Получены расчетные значения полей скорости, температуры, массовой концентрации вдуваемого газа, турбулентного трения и турбулентных потоков тепла и массы, с использованием которых рассчитано распределение турбулентных чисел Шмидта и Прандтля по толщине пограничного слоя в сравнении с постоянными значениями турбулентных чисел Шмидта и Прандтля.

Показано, что профиль скорости слабо изменяется по длине пластины от менее заполненного в области вдува до более заполненного в области завесы. Массовая концентрация вдуваемого газа (гелия) в области вдува возрастает до величины, при которой относительный коэффициент трения близок к величине, соответствующий критическому вдуву. Профили температуры в области вдува также существенно изменяются по толщине пограничного слоя и слабо изменяются в области завесы. Характер зависимостей турбулентных потоков массы и тепла в пограничном слое существенно меняется при переходе из области вдува в область завесы при менее существенном изменении турбулентного трения.

Показано, что зависимости турбулентных чисел Прандтля и Шмидта по толщине пограничного слоя y/δ области вдува далеки от постоянных значений $Sc_t=Pr_t=0.85$ и лишь в области завесы при $y/\delta > 0.1$ близки к упомянутому постоянному значению (рис. 1). В пристеночной области зависимости $Sc_t(y/\delta)$ и $Pr_t(y/\delta)$ (в особенности) очень сильно меняются.

Проведено исследование влияния переменности турбулентных чисел Прандтля и Шмидта на характеристики тепло- и массообмена, в частности, на температуру стенки и массовую концентрацию вдуваемого газа (гелия) на стенке по длине пластины. Показано, что в области вдува переменность турбулентного числа Шмидта слабо сказывается изменении по длине массовой концентрации гелия на стенке, в то время как переменность турбулентного числа Прандтля заметно сказывается на изменении по длине температуры стенки. В области завесы турбулентные числа Шмидта и Прандтля близки к постоянной величине ~ 0.85 . Таким образом, предположение о постоянстве турбулентных чисел Шмидта и Прандтля (в особенности) во всей области течения нельзя считать оправданным, если требуется высокая точность определения характеристик тепло- и массообмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-19-00234).

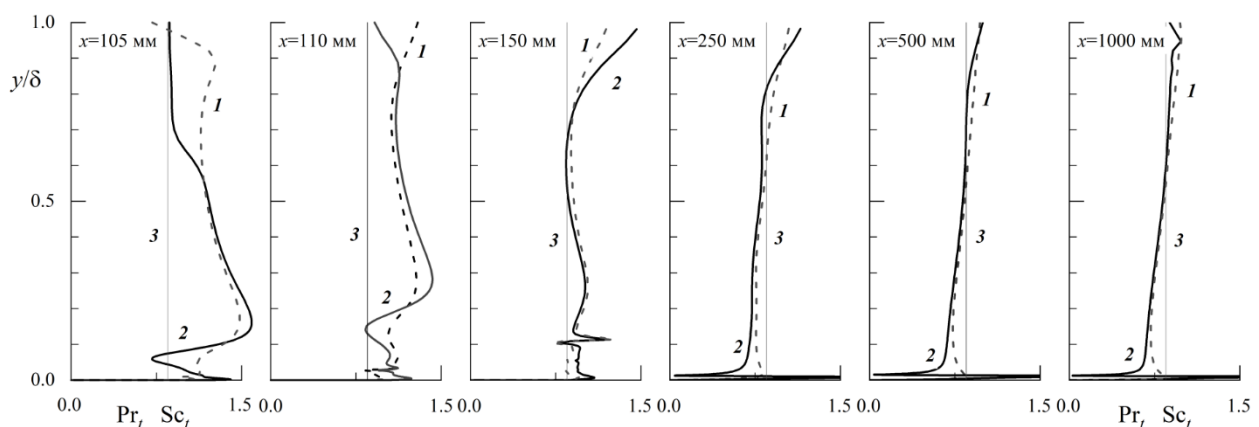


Рис. 1. Профили турбулентных чисел Шмидта Sc_t (1) и Прандтля Pr_t (2) в ряде сечений по длине пластины x , 3 – $Sc_t=Pr_t=0.85$.

1. Лущик В.Г., Макарова М.С. Особенности теплообмена на проницаемой поверхности в сверхзвуковом потоке при вдуве инородного газа // Изв. РАН. МЖГ. 2020. № 5. С. 61-64.

2. Лущик В.Г., Макарова М.С. Турбулентное число Прандтля в пограничном слое на пластине: влияние молекулярного числа Прандтля, вдува (отсоса) и продольного градиента давления // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 2. С. 177-190.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СДВИГОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Макарова М.С., Луцик В.Г., Попович С.С.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: makarova@imec.msu.ru

Предложена методика моделирования турбулентного течения в канале с непроницаемыми и проницаемыми стенками при наличии теплоподвода к стенке. Для замыкания уравнений пограничного слоя используется RANS-модель турбулентности, дополненная уравнением переноса для турбулентного потока тепла [1]. Расчеты проведены для развитого турбулентного течения в круглой трубе с непроницаемыми и проницаемыми стенками при параметрах, соответствующих известным экспериментам, с которыми проводилось сравнение. Проведена оценка влияния переменности теплофизических свойств на характеристики теплообмена в трубе [2]. Использование уравнения переноса для турбулентного потока тепла позволяет учесть сложную зависимость турбулентного числа Прандтля от молекулярного числа Прандтля в логарифмическом и вязком подслое [3]. Показано, что предположение о постоянстве турбулентного числа Прандтля в инженерных приложениях не обеспечивает высокой точности расчетов.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (№19-79-10213).

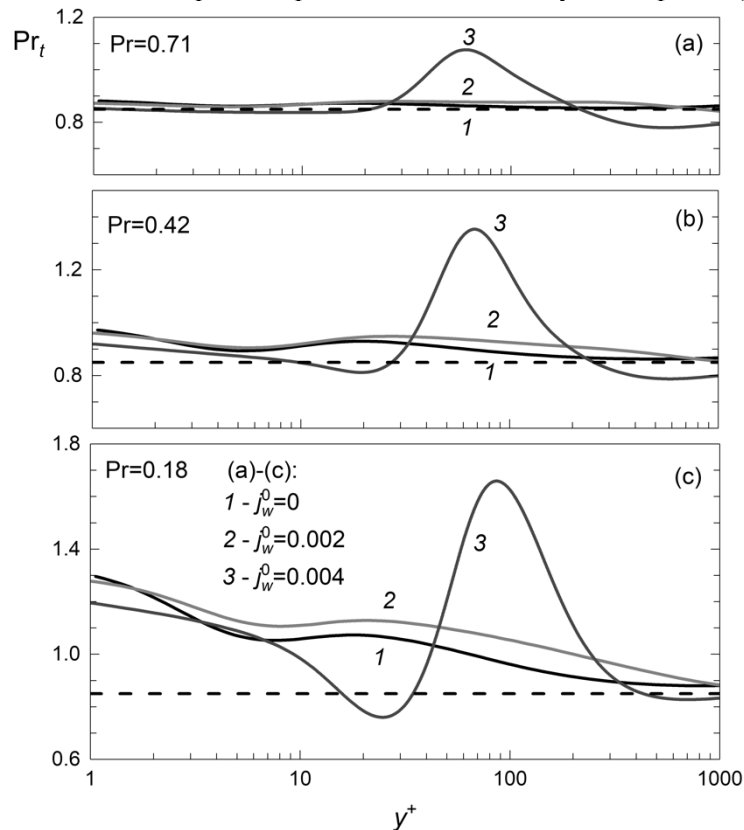


Рис. 1. Влияние молекулярного числа Прандтля Pr и интенсивности отсоса на турбулентное число Прандтля $Pr_t(y^+)$.

1. Луцик В.Г., Павелъев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 3. С. 13-25.
2. Leont'ev A., Lushchik V., Makarova M. Heat and mass transfer in a tube with permeable walls: influence of suction and the Prandtl number // Proceedings of the Eight International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, September 15-18 2015, Begell House INC, USA. 2015. P. 145–148.
3. Leontiev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. Study of effect of molecular Prandtl number, transpiration, and longitudinal pressure gradient on flow and heat transfer characteristics in boundary layers// Computational Thermal Sciences. 2019. V. 11. P. 41–49.

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Макаров Г.Р.^{1,2}, Охитина А.С.²

¹Московский Физико-Технический Институт (НИУ)

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

e-mail: makarov.gr@phystech.edu

Малые космические аппараты (КА) широко применяются для решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве исполнительных органов системы управления ориентацией используются маховики, которые обеспечивают высокую точность и быстродействие. КА в процессе съемки может находиться в двух режимах – обеспечивающее съемку угловое движение и переориентация между объектами интереса. Первый режим однозначно задается параметрами съемки и аппаратуры. Второй режим имеет фиксированные значения ориентации, угловой скорости и ускорения на концах, а движение между ними ограничивается лишь возможностями маховиков. При этом скорость маневра влияет на собранный объем данных.

В работе решается задача построения опорной траектории углового движения КА, обеспечивающей оптимальный по быстродействию разворот между объектами интереса. Опорное движение строится на основе подхода, описанного в [1,2]. Для поиска оптимальных параметров опорного движения используется метод роя частиц (PSO). Каждая частица принимает решение о перемещениях на основе информации о лучших положениях – собственном и глобальном. Вклад компонент в скорость частиц регулируется с помощью соответствующих коэффициентов, которые подбираются так, чтобы обеспечить сходимость метода [3]. PSO не требует вычислений градиента оптимизируемого функционала, а также позволяет учесть ограничения на искомые параметры.

В работе проводится исследование сходимости метода роя частиц в зависимости от коэффициентов скорости частиц и настройка метода для решения поставленной задачи. На рис.1а представлена найденная методом роя оптимальная опорная траектория переориентации КА. На рис.1б показано изменение суммарного кинетического момента маховиков за время маневра, а также предельно допустимые значения (красным).

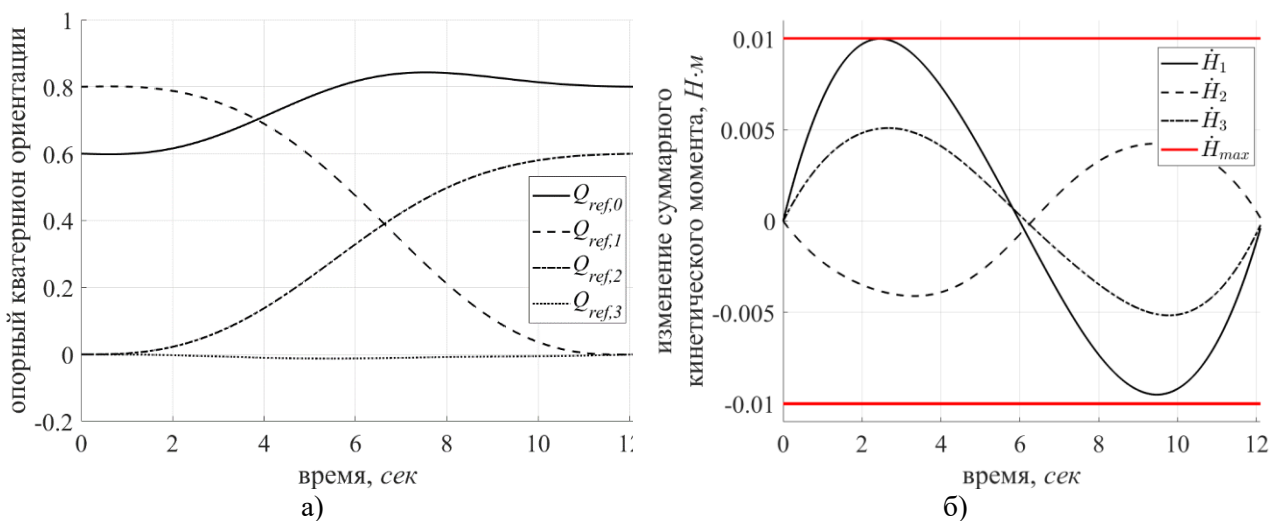


Рис.1. Оптимальная по быстродействию опорная траектория переориентации КА с учетом ограничений на управление: а) кватернион ориентации; б) изменение суммарного кинетического момента маховиков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10009, <https://rscf.ru/project/22-71-10009/>.

1. Ткачев С.С., Шестоперов А.И. Построение опорной траектории третьего порядка гладкости углового движения космического аппарата // Математическое моделирование. 2021. Т. 33. № 10. С. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.20948/mm-2021-10-01>.
2. Dam E. B., Koch M., Lillholm, M. Quaternions, Interpolation and Animation. 1998.
3. Simon D. Evolutionary Optimization Algorithms. Wiley: Hoboken, NJ, USA. 2013. 742p.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЕССОВАНИЕМ, ЛИТЬЁМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И МОДЕЛИРОВАНИЕМ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Масталыгина Е.Е.^{1,2}, Алексанова Е.А.¹, Прокопович К.В.^{1,3}, Кузьмин А.М.^{1,4}

¹Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва

²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

³Университет науки и технологий МИСИС, Москва

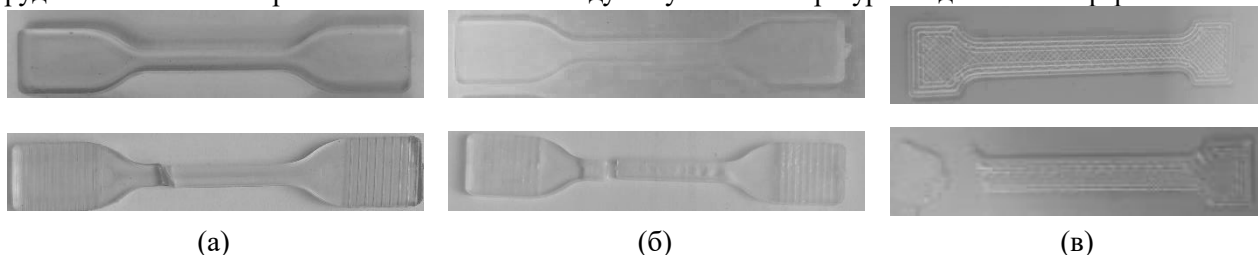
⁴Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

e-mail: elena.mastalygina@gmail.com

Материалы на основе полилактида (ПЛА) востребованы во многих сферах применения. Интерес к этому полимеру обусловлен его способностью к биоутилизации в условиях промышленного компоста, биосовместимостью и биорезорбируемостью, а также относительно высокими технологическими и механическими свойствами по сравнению с другими биоразлагаемыми пластиками [1]. ПЛА возможно перерабатывать с применением ряда типовых для термопластичных полимеров технологий: горячего прессования, литья под давлением, 3D-печати и др. Метод получения конечного изделия оказывает значительное влияние на структуру материалов и их деформационно-прочностные свойства [2].

Объектом исследования являлся полилактид (полимолочная кислота) марки 4043D Nature Works (США). Были проанализированы закономерности поведения образцов на основе ПЛА при деформации растяжения, полученные тремя разными способами. Прессование осуществлялось на гидравлическом прессе РПА-12 «Биолент» при $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ и давлении 4,9 МПа с последующей закалкой в воде и вырубкой с помощью пневматического вырубного прессы GT-7016-AR Gotech. Литьё под давлением осуществлялось на литьевой машине Babyplast 6/10VP при $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ (усилие смыкания полуформ – 5 МПа; давление впрыска – 60 МПа; давление подпрессовки – 43 МПа; скорость впрыска – 11,6 мл/с). 3D-печать методом послойного направления нити осуществлялась на 3D-принтере Creality Ender 3 при $(220 \pm 5)^\circ\text{C}$ (высота слоя – 0,2 мм, температура стола – 60°C). Испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине GT-AI-7000 M Gotech при скорости движения зажимов – 2,5 мм/мин в соответствии с ГОСТ 11262 (тип образца 1А, лопатка) в 5-ти кратной повторяемости.

Образцы, полученные горячим прессованием с последующей закалкой и методом 3D-принтинга с охлаждением воздухом, характеризовались большим относительным удлинением при разрыве (4–4,5%), чем образцы, полученные методом литья (2,7%). При этом модуль упругости для отлитых образцов был наибольшим по сравнению с другими образцами (2925 МПа), что говорит о зависимости параметра скорее от скорости кристаллизации ПЛА при охлаждении из расплава, чем от метода получения. Прочность при разрыве была максимальной для образца, полученного методом горячего прессования под давлением (82 МПа), что говорит о наименьшей дефектности материала. Прочность при растяжении образца, напечатанного с помощью 3D-принтера, в большей степени зависела от межслоевой адгезии слоёв печати. Прочность отлитых образцов составляла 64 МПа. Снижение параметра по сравнению с прессованными образцами, по-видимому, связано с трудностями литья материалов на основе ПЛА в виду его узкого температурного диапазона переработки.



Примеры изображений до и после испытания на растяжение образцов, полученных разными способами: горячее прессование (а), литьё под давлением (б), 3D-печать (в).

Масталыгина Е.Е. выражает благодарность финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-3573.2022.1.3).

1. Vayshbeyn L.I., Mastalygina E.E., Olkhov A.A., Podzorova, M.V. Poly(lactic acid)-Based Blends: A Comprehensive Review // Appl. Sci. 2023. 13. 5148.

2. Mejia E., Cherupurakal N., Mourad A.-H.I., Al Hassanieh S., Rabia M. Effect of Processing Techniques on the Microstructure and Mechanical Performance of High-Density Polyethylene // Polymers. 2021. 13. 3346.

ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ N-ЗВЕННОГО ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА

Медведева Т.Н.

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Научно-технологический университет «Сириус», Олимпийский просп., 40, Сочи, Краснодарский край
e-mail: taya.medved000gmail.com

1. Математическая модель

Рассматривается n-звенный перевернутый маятник, расположенный на подвижном основании (рис.1). Уравнения, описывающие динамику системы, имеют вид:

$$\ddot{\phi} = -J_1^{-1}G_1\phi + J_1^{-1}H\dot{\psi} + J_1^{-1}W(\phi, \dot{\phi}),$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} M + nm & nml & (n-1)ml & \dots & ml \\ nml & nml^2 & (n-1)ml^2 & \dots & ml^2 \\ (n-1)ml & (n-1)ml^2 & (n-1)ml^2 & \dots & ml^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ ml & ml^2 & ml^2 & \dots & ml^2 \end{bmatrix},$$

$$G_1 = \text{diag}\{0, -nmg, -(n-1)mg, \dots, -mg\}$$

Здесь m -масса одного звена маятника и l -длина одного звена. Уравнения можно переписать в форме линейной системы с управлением и возмущением:

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_v v,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ J_1^{-1}G_1 & 0 \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ -J_1^{-1}H \end{bmatrix}, B_v = [0 \quad I_n]^T$$

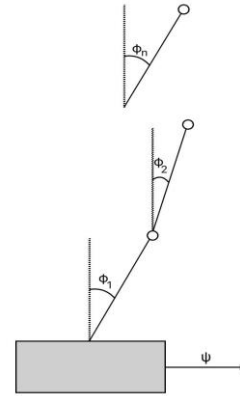


Рис.1. n-звенный маятник на подвижном основании

2. Постановка задачи оптимальной стабилизации

Требуется построить оптимальное по Парето линейное управление, в форме обратной связи по состоянию " $u = Kx$ ", стабилизирующее n-звенный маятник в вертикальном положении. Критериями оптимальности выбраны показатель J_1 , который определяет угловые отклонения звеньев маятника от вертикали, и показатель J_2 , который определяет максимальное значение управления:

$$J_1(K) = \sup_{v \neq 0} \frac{\max_{i \in [1, n]} \max_t |x_i|}{\|v\|_2}, \quad J_2(K) = \sup_{v \neq 0} \frac{\max_t |u|}{\|v\|_2}, \quad \|v\|_2^2 = \int_0^\infty |v(t)|^2 dt$$

3. Результат

Задача поиска оптимальных коэффициентов управления K , сводится к задаче полуопределенного программирования с ограничениями, а именно к задаче поиска $\min \gamma^2$, при котором выполняются линейные матричные неравенства и уравнения [1]:

$$Y > 0, \quad Z = KY$$

$$AY + Y A^T + B_u Z + Z^T B_u^T + B_v B_v^T = 0,$$

$$\begin{bmatrix} Y & Y C_k^T \\ C_k Y & \gamma^2 \alpha^2 I \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} Y & Z^T \\ Z & \gamma^2 (\alpha - 1)^2 I \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$C_k = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0], \quad k = 1, \dots, n$$

Решая задачу для заданного $\alpha \in [0, 1]$, находим значения Y_α, Z_α . Тогда коэффициенты управления находятся как $K = Z_\alpha Y_\alpha^{-1}$. Таким образом, для множества значений α получаем множество оптимальных по Парето решений.

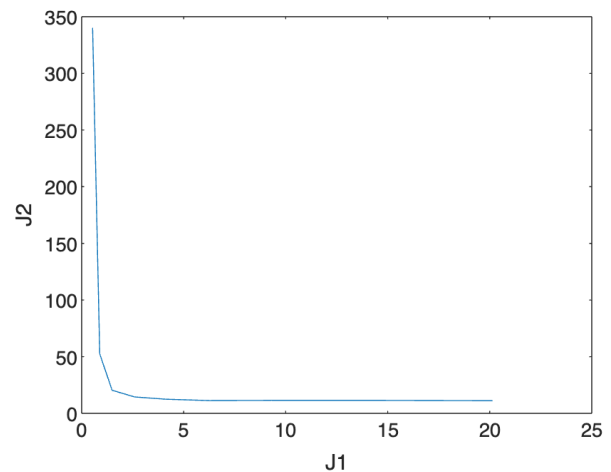


Рис.2. Парето-фронт для 4-звенного маятника.

1. Баландин Д.В., Коган М.М. Оптимальное по Парето обобщенное H2 - управление и задачи виброзащиты // Автомат. и телемех.. 2017. Вып. 8. С. 76–90.

ТЕЛА ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Меркулов Д.И.¹, Пелевина Д.А.^{1,2}

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

²Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: merkulovdima@mail.ru

Намагничивающиеся эластомеры (НЭ) – это дисперсные среды, состоящие из упругой полимерной матрицы и распределенных в ее объеме ферромагнитных микро- или наночастиц. Если при изготовлении НЭ феррочастицы выстроятся в цепочки или ориентируются осями легкого намагничивания вдоль некоторого направления, то такой материал приобретет анизотропные свойства. Магнитные свойства анизотропных намагничивающихся эластомеров (АНЭ) экспериментально исследованы в работе [1].

В работе рассматривается движение сферического тела из АНЭ под действием неоднородного магнитного поля, ранее теоретически изученное в [2]. В начальный момент времени тело располагалось на оси электромагнитной катушки (Рис. 1) и при включении тока двигалось вбок по наклонной плоскости (Рис. 2) с возможным последующим отрывом от нее (либо остановкой на плоскости в положении равновесия) под действием горизонтальной составляющей магнитной силы и момента магнитных сил.

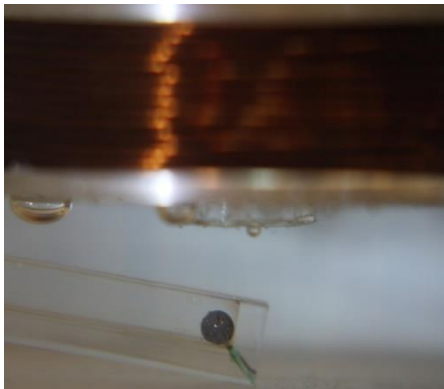


Рис. 1. Тело из АНЭ в начальный момент времени

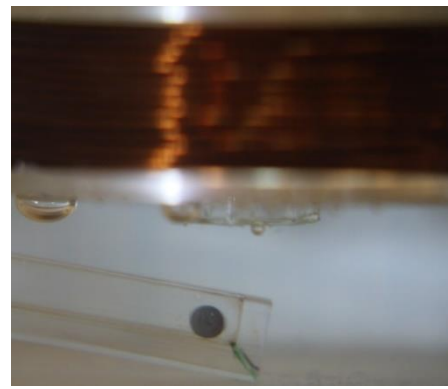


Рис. 2. Движение тела из АНЭ при включении тока

Кроме того, в данной работе исследовано движение маятника с закрепленным на его конце сферическим телом из АНЭ в неоднородном магнитном поле. Жесткая фиксация тела на стержне маятника позволяет исключить из рассмотрения момент магнитных сил и зарегистрировать боковое отклонение тела только под действием горизонтальной составляющей магнитной силы.

Построены траектории тел при различных токах в катушке. Показано, что в зависимости от величины тока свободное тело из АНЭ может занять положение равновесия на наклонной плоскости либо оторваться от нее, а маятник отклоняется от начального положения равновесия под действием горизонтальной составляющей магнитной силы. Построены математические модели движения тел и проведены численные расчеты на основе параметров эксперимента. Получено качественное соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-71-10002, <https://rscf.ru/project/20-71-10002/>.

1. Demin A.A., Merkulov D.I., Pelevina D.A., Kalmykov S.A., Naletova V.A., Determination of parameters of anisotropic magnetizable elastomer // *Magnetohydrodynamics*, 2019, Vol. 55, No. 3, pp. 347-352.

2. Меркулов Д.И., Пелевина Д.А., Турков В.А., Налетова В.А., Движение в поле витка с током тела из анизотропного намагничивающегося эластомера с учетом взаимодействия с наклонной поверхностью // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*, 2023, № 1, С. 39-44.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ В ДЕТОНАЦИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Михальченко Е.В.^{1,2}, Никитин В.Ф.^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

²Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр

Научно-исследовательский институт системных исследований

Российской академии наук», Москва

e-mail: MikhailchenkoLena@yandex.ru

Вопрос о реализации двигателя с рабочим циклом, основанном на сгорании топлива в постоянном объеме, возник еще в 20 веке, но из-за проблем реализации, а также из-за бурного развития и совершенствования двигателей с циклом, основанном на сжигании топлив при постоянном давлении, данный вопрос был отложен на долгие годы. Однако, с появлением новых типов материалов и топлив интерес к таким двигателям был восстановлен и в последние годы количество работ по данной тематике только растет [1–2]. В работе представлены результаты численного моделирования процессов в камере сгорания детонационного двигателя. Проведено трехмерное численное моделирование камеры сгорания двигателя с вращающейся детонационной волной цилиндрического типа с внутренним корпусом. Проведено трехмерное моделирование нескольких циклов работы пульсирующего детонационного двигателя. В основу математической модели были положены многокомпонентная газодинамическая модель с учетом химических превращений и турбулентная модель RANS. Для описания горения ацетилена использовали короткую кинетическую схему, включающую в реакцию следующие компоненты: C_2H_2 , CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O , OH , O , H , N_2 .

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания № 1021061509701-5-1.2.1 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов и горения» (FNEF-2022-0021).

1. Wolanski P. Detonative propulsion // Proceedings of the Combustion Institute. 2013. V. 34(1). P. 125–158.
2. Anand V., Gutmark E. Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities // Progress in Energy and Combustion Science. 2019. V. 73. P. 182–234.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА СИЛЫ И МОМЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Мухачев Б.О.^{1,2}, Ткачев С.С.¹

¹ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
e-mail: mukhachev.bo@phystech.edu

Моделирование движения космического аппарата (КА) на низких околоземных орбитах требует расчета силы и момента, обусловленных взаимодействием поверхности спутника с набегающим потоком. Для аппаратов с небольшим баллистическим коэффициентом и простой формой для описания этих величин, как правило, оказывается достаточно относительно простой модели. В случае же, когда КА обладает большой парусностью и/или имеет сложную форму, возникает необходимость разрабатывать более сложную модель, которая учитывает и форму, и разный характер взаимодействия набегающего потока с поверхностью КА. Работа посвящена разработке и программной реализации такой модели. Полагается, что движение происходит на высотах от 200 км, поэтому течение полагается свободномолекулярным, а взаимодействие – диффузно-зеркальным [1].

Поверхность космического аппарата (КА) разбивается на треугольники, для каждого из которых рассчитывается сила и момент. Главные вектор и момент сил аэродинамического сопротивления являются результатом суммирования по тем треугольникам, нормали которых направлены в сторону набегающего потока. Набор таких элементарных поверхностей меняется при движении КА, поэтому прямое суммирование может потребоваться на каждом подшаге интегрирования, что существенно замедлит численное интегрирование. По этой причине для практической реализации разработанного подхода в методе численного интегрирования движения КА используется интерполяция между узловыми точками, являющимися вершинами икосферы. Каждый узел представляет собой набор значений – направление вектора набегающего потока (определяется координатами вершины икосферы), главные вектор и момент сил аэродинамического сопротивления (вычисляются один раз). В промежуточных значениях вектора относительной скорости КА и атмосферы последние две величины вычисляются с помощью формул линейной интерполяции [2].

Метод реализован в программной среде MATLAB. Модели КА и икосферы построены с помощью свободно-распространяемого ПО Blender 3D (рис.1), где были созданы разбиение КА на элементарные площадки в виде треугольников и сетка для направлений скорости набегающего потока частиц в виде икосферы.

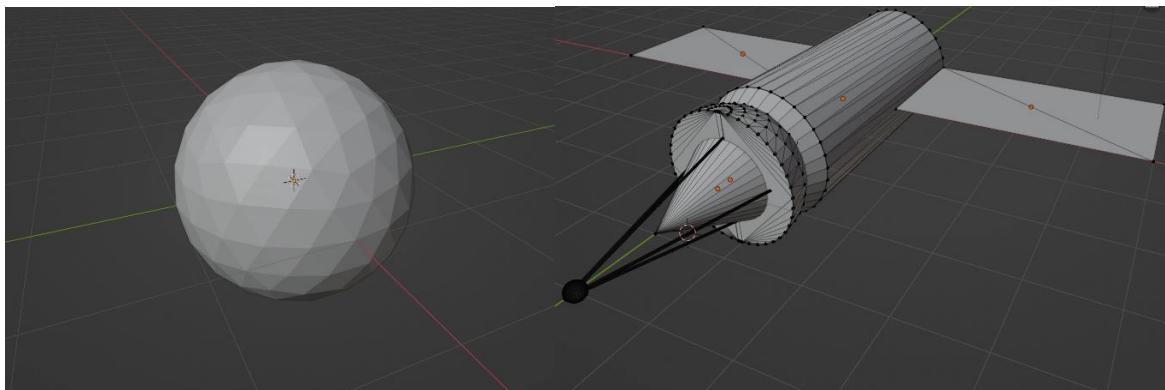


Рис.1. Сферическая сетка по направлениям вектора скорости налетающего потока (слева) и простейшая модель спутника с панелями и антенной (справа).

1. В.В. Белецкий, А.М. Яншин, 1984. Влияние аэродинамических сил на вращательное движение искусственных спутников.
2. Robert J. Renka, 1984. Interpolation of Data on the Surface of a Sphere, DOI: 10.1145/2701.2703.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЖИДКОСТИ В НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЕ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ

Насырова Д.А.¹, Башмаков Р.А.^{1,2}

¹Институт Механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа

e-mail: dinasyrova@mail.ru, Bashmakov_Rustem@mail.ru

Нами были рассмотрены собственные колебания столба жидкости в нефтяной скважине, сообщаемой с системой радиальных трещин, возникающие при резком закрытии или открытии насосов скважины (гидроударе). Период колебаний, интенсивность затухания колебаний определяются протяженностью столба жидкости, ее реологическими свойствами, а также коллекторскими характеристиками призабойной зоны пласта. На основе математической модели, описывающей движение столба жидкости в скважине, когда ее верхний конец открыт, и фильтрацию в призабойной зоне, подверженной ГРП, получены решения задачи о собственных затухающих колебаниях столба жидкости в скважине. Изучены зависимости частоты и коэффициента затухания колебаний давления на различных участках скважины от значений проницаемости пласта, параметров ГРП.

$$\sin(Kl) = 0, \quad K^2 = \frac{\omega^2}{C^2} \left(1 + \frac{2}{y} \right) \left(1 + \frac{2nd_f k_f x C^2}{av i \omega} \frac{K_1(xa)}{K_0(xa)} \right)$$

Это уравнение, с учетом выражения для K представляет собой характеристическое уравнение для определения комплексной частоты $\omega = \Omega + i\delta$. Причем действительная часть Ω определяет круговую частоту колебаний, а мнимая часть интенсивность затухания. Уравнение имеет множество решений удовлетворяющих условию $Kl = \pi k, k = 1, 2, 3, \dots$

Показано, что акустическая диагностика, основанная на анализе собственных колебаний в скважине, может служить действенным инструментом для диагностики призабойной зоны скважины.

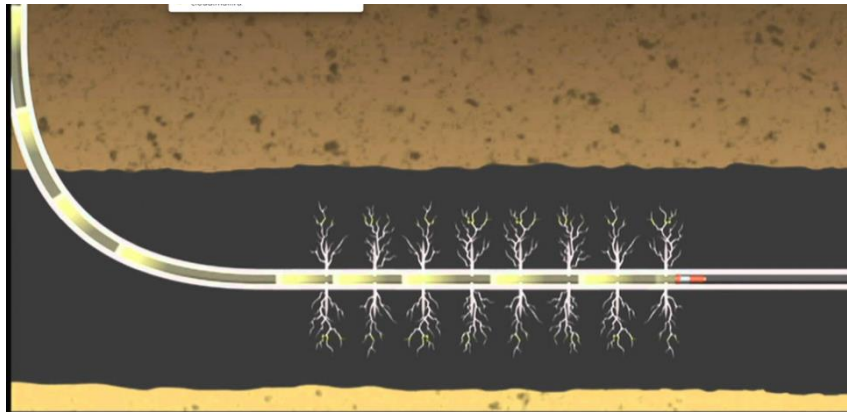


Рис.1. Схема скважины с N радиальных трещин.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-11-00207, <https://rscf.ru/project/21-11-00207/>.

1. Башмаков Р.А., Насырова Д.А., Шагапов В.Ш. Собственные колебания жидкости в скважине, сообщаемой с пластом, при наличии трещины ГРП // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86. Вып. 1. С. 88-104.

2. Башмаков Р.А., Насырова Д.А., Шагапов В.Ш., Хакимова З.Р. Колебания столба жидкости в открытой скважине и сообщаемой с пластом, подверженным ГРП // Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 7. Вып. 4. С. 872-880

3. Аносова Е.П., Нагаева З.М., Шагапов В.Ш. Фильтрация флюида к скважине через радиальную трещину ГРП при постоянном расходе // Изв. РАН. МЖГ. 2023. № 2. С. 90-101.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Носов Ю.О., Каменских А.А.

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

Активное развитие вычислительной техники позволяет решать задачи прогнозирования работы и рационализации конструкции при помощи численных алгоритмов [1]. В свою очередь, для минимизации погрешности между реальной конструкцией и численной моделью необходимо учитывать поведение материалов элементов конструкции: физико-механические, термомеханические, фрикционные свойства и т.д. При этом, для реализации задач прогнозирования работы конструкции, необходимо учитывать динамические характеристики материалов [2].

В рамках работы выполнено экспериментальное исследование динамических характеристик пастообразных смазочных материалов, а также рассматривается задача идентификации математической модели их поведения. Пастообразные смазочные материалы активно используются в ответственных узлах трения мостовых сооружений. В качестве объектов исследования рассмотрены 4 смазочных материала: ЦИАТИМ-221, ЦИАТИМ-221F, ТОМФЛОН СК 170 FH, ТОМФЛОН СК 240 FM. В рамках экспериментального исследования получены зависимости комплексного модуля сдвига материала в зависимости от температуры (рис. 1).

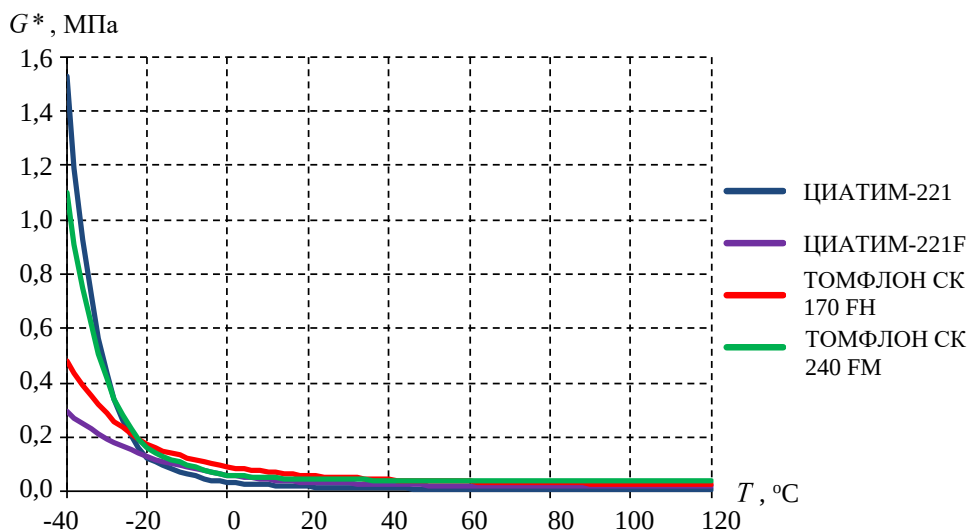


Рис. 1. Зависимость комплексного модуля сдвига в зависимости от температуры для смазок.

Можно заметить, что значение комплексного модуля сдвига при отрицательных температурах значительно возрастает, что связано с замерзанием смазочного материала и его переходу в твердое тело, что прослеживается при визуальных осмотрах смазки при экспериментах.

На основе экспериментальных данных проведена идентификация математической модели смазочного материала с использованием модели Ананд и рядов Прони на основе тела Максвелла [3]. Установлено, что данные модели можно использовать в рамках компьютерного инжиниринга при частотах выше 1 Гц. Для малых частот необходимо использовать более сложные модели вязкоупругого поведения материала, подбор которых является дальнейшим направлением развития работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-01313.

1. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifricition layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // Lubricants. 2022. Vol. 10, No. 2. Art. 30.

2. Goryacheva I. G., Zobova A. A. Dynamics of deformable contacting bodies with sliding, rolling, and spinning // International Journal of Mechanical Sciences. 2022. Vol. 216. Art. 106981.

3. Каменских А. А., Носов Ю. О., Струкова В. И. Численная процедура идентификации свойств твердых смазочных материалов // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. 2022. С. 188-190.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНОЙ ИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПЕРЕМЫЧКИ

Носов Ю.О., Каменских А.А., Николаев А.В., Аль-Раммахи А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Горнодобывающий сектор страны оказывает негативное влияние на экологическую обстановку как на земной поверхности, так и на водную и воздушную экосистему. Считается, что по окончании работ в выработках влияние на окружающую среду будет стабилизироваться. Но исследования это опровергают: после закрытия шахт длительное время происходят изменения состояния подземных вод, заболачивание территорий, подвижки массивов горных пород, не контролируемая миграция взрывоопасных газов [1, 2]. Проблема безопасности строений над законсервированными шахтами распространена не только в России. Так в Европе насчитывалось 226 добывающих областей, в 46% которых добыча была полностью прекращена [3]. Согласно распоряжениям Правительства Российской Федерации № 2395-1 (ред. от 28.06.2022, с изм. от 14.07.2022) от 21 февраля 1992 г. «О недрах» исследования, направленные на повышение эффективности технологий ликвидации горных выработок являются актуальными. Для этого необходимо пустые горные выработки заполнять твердеющим впоследствии раствором, т.е. производить гидрозакладку. В 2019 году ООО «Горные вентиляционные устройства» была предложена вентиляционная быстровозводимая шахтная перемычка [4], которая может быть переделана для технологии гидрозакладки на основе ряда проектных изысканий и исследований работы конструкции в рамках компьютерного инжиниринга. На рисунке представлена общая схема закладки горизонтальных слоев шахтного пространства и вид несущего каркаса шахтной изоляционной перемычки.

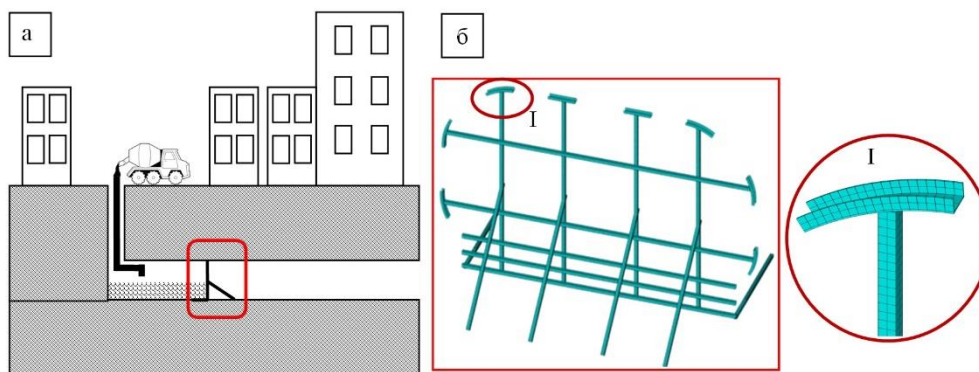


Рис.1. Общая схема гидрозакладки горизонтального слоя (а) и изоляционная перемычка (б).

В рамках работы выполнено создание параметризированной модели шахтной перемычки с учетом изменения геометрии выработки на прямоугольно-сводчатую форму. Рассмотрено деформирование конструкции при послойном заполнении выработанного пространства закладочным материалом при совместном деформировании несущего каркаса и изоляционного материала, а также при реализации контактного взаимодействия между каркасом и изоляционным материалом. Исследовано влияние толщины стенки балок несущего каркаса на работу узла в рамках деформационного и модального анализа. Также исследовано влияние материалов, применяемых для создания конструкции на напряженно-деформированное состояние узла.

1. Дмитриенко В.А., Алимова К.С. Влияние закрытия шахт на безопасность строительных объектов // Сборник VI Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования». 2020. С. 24-28.

2. Белодедов А.А., Должиков П.Н., Легостаев С.О. Анализ механизма образования деформаций земной поверхности над горными выработками закрытых шахт // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2017. С. 160-168.

3. Wirth P, Cernic Mali B.; Fischer W. Post-Mining Regions in Central Europe – Problems, Potentials, Possibilities. Oekom: München, Germany, 2012. 275 p.

4. Клишин В.И., Николаев А.В., Максимов П.В. Расчёт шахтной вентиляционной перемычки нового типа и отдельных её элементов // Известия Тульского государственного университета // Науки о Земле. 2020. № 3. С. 278-289.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗУБА С НЕКАРРИОЗНЫМ ПОРАЖЕНИЕМ ДО И ПОСЛЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ

Носов Ю.О., Каменских А.А., Ковыляева М.С.

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

Распространенность некариозных заболеваний, в частности клиновидных дефектов среди населения мировой популяции по данным Huysmans М.С. и Nascimento М.М. составляет до 17% в возрастных группах от 20 до 70 лет. Клиновидные дефекты достаточно распространенное заболевание, которое может доставлять значительный дискомфорт пациентам [1, 2]. Появление новых стоматологических материалов и технологий лечения делает актуальным анализ работы элементов зубного ряда до и после реставрации дефекта с использованием численного моделирования. В работе рассмотрено моделирование стандартной реставрации клиновидного дефекта с помощью пломбы и с использованием новой технологии предложенной научной группой ПГМУ г. Пермь во главе с д.м.н., профессором Асташиной Н.Б. [3]. На рис. представлен вид зуба с реставрацией клиновидного дефекта при помощи новой технологии. Геометрии протетической вкладки может варьироваться. Представлен один из возможных вариантов геометрии.

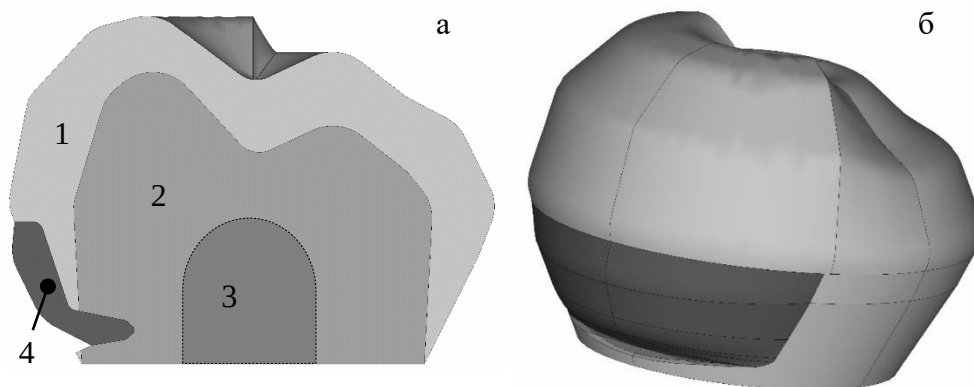


Рис.1. Зуб с реставрацией клиновидного дефекта с использованием протетической вкладки:
а) центральное сечение коронковой части; б) изометрия коронковой части;
1 – эмаль; 2 – дентин; 3 – пульпа; 4 – протетическая вкладка.

В рамках работы выполнено создание параметризованных моделей: здоровый зуб; зуб с учетом клиновидного дефекта V-образной формы; зуб со стандартной реставрацией и зуб с реставрацией в виде протетической вкладки. Исследовано влияние широкого диапазона нагрузки действующей от зуба антагониста: вертикальная нагрузка и под углам 45°. Исследовано влияние характера сопряжения зуба и реставрации. Рассмотрена возможность выскальзывания реставрации из полости при деформировании зуба. Все исследования для нового типа реставрации выполнены для представленной геометрии вкладки и созданного для нее выреза. Требуется оценка влияния геометрии протетической вкладки на работоспособность зуба.

1. Kamenskikh A.A., Sakhabutdinova L., Astashina N., Petrachev A., Nosov Yu. Numerical modeling of a new type of prosthetic restoration for non-carious cervical lesions // Materials. 2022. Vol. 15. № 15. Art. 5102.
2. Sakhabutdinova L., Kamenskikh A.A., Kuchumov A.G., Nosov Y., Baradina I. Numerical study of the mechanical behaviour of wedge-shaped defect filling materials // Materials. 2022. Vol. 15. № 20. Art. 7387.
3. Патент № 2719898 С1 Российская Федерация, МПК А61С 8/00. Способ лечения клиновидного дефекта зуба и устройство для его осуществления: № 2019108928: заявл. 27.03.2019; опубл. 23.04.2020 / Н.Б. Асташина, А.С. Петрачев, С.В. Казаков, Е.П. Рогожникова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

РАЗРАБОТКА ПРОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ FeNiCr-B₄C ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Окулов А.В.¹, Степченко А.К.¹, Коробов Ю.С.¹, Макаров А.В.¹, Юсупова О.С.¹, Корх Ю.В.¹,
Кузнецова Т.В.¹, Харанжевский Е.В.²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург

²Удмуртский государственный университет, Ижевск

e-mail: okulovartem@imp.uran.ru

В работе представлена механоструктурная характеристика композиционных FeNiCr-B₄C (*in-situ* легированных 5 и 7 мас. % B₄C) покрытий, нанесенных методом импульсной лазерной наплавки на подложку из AISI 1040 стали. Согласно СЭМ анализу микроструктуры, поперечные сечения всех синтезированных образцов характеризуются средней толщиной покрытия 350 ± 20 мкм и достаточно узкой (100 ± 20 мкм) переходной зоной «покрытие-подложка». Обнаружено, что покрытия имеют незначительное количество пор и трещин. Механическая характеристика FeNiCr-B₄C покрытий показала, что *in-situ* легирование 5 и 7 мас. % B₄C приводит к заметному увеличению микротвердости на 86 и 157 %, соответственно, по сравнению с ранее полученным FeNiCr покрытием без добавки B₄C (Рис. 1).

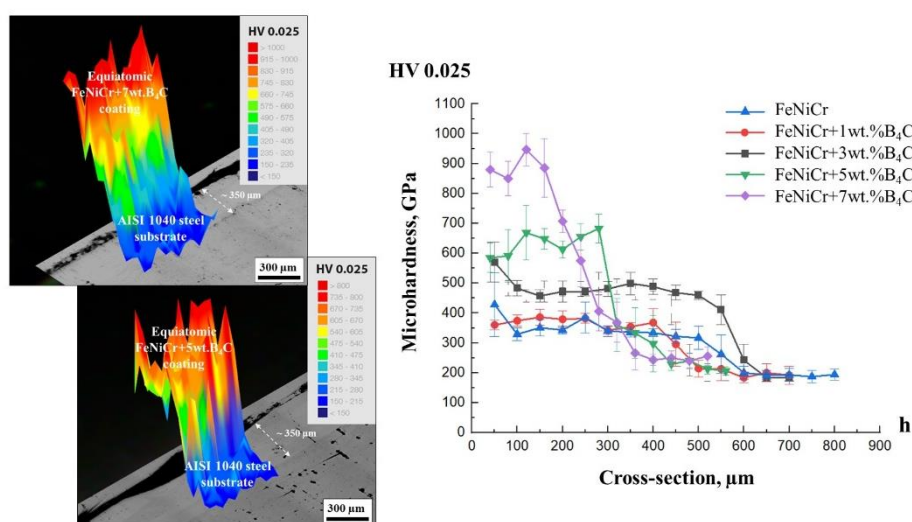


Рис. 1. Эволюция механического поведения композиционных FeNiCr-B₄C покрытий при микроиндентировании.

Таким образом, процесс *in-situ* легирования в сочетании с увеличением содержания B₄C можно рассматривать как перспективный метод для получения прочных композиционных FeNiCr-B₄C покрытий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (темы «Аддитивность» № 121102900049-1 и «Структура» № 122021000033-2).

1. P. Matteazzi, G. Caër, A. Mocellin. Synthesis of Nanostructured Materials by Mechanical Alloying // Ceramics International. – 1977. – Vol. 23, No. 1. – P. 39–44.
2. Jingfeng Li, Toshiro Matsuki, R. Watanabe. Mechanical-Alloying-Assisted Synthesis of Ti₃SiC₂ Powder // Journal of the American Ceramic Society. – 2002. – Vol. 85, No. 4. – P. 1004–1006.
3. P. Matteazzi, G. Caër. Room-Temperature Mechanosynthesis of Carbides by Grinding of Elemental Powders // Journal of the American Ceramic Society. – 1991. – Vol. 74, No. 6. – P. 1382–1390.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ФЕМТОСПУТНИКОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА АНТЕНН СВЯЗИ

Орлов В.В., Иванов Д.С.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

e-mail: orlov.vv@phystech.edu

Работа посвящена проблеме относительной навигации фемтоспутников по измерениям амплитуды сигналов межспутниковой связи. Исследование движения ультрамалых аппаратов на низкой околоземной орбите является актуальной задачей, групповой полёт таких аппаратов позволит проводить многоточечное зондирование ионосферы, магнитосферы и атмосферы Земли. Задача определения относительного движения спутников может решена с использованием измерений бортовой навигационной системы, с помощью измерений оптических сенсоров или дальномеров [1]. Однако, для фемтоспутников, масса которых меньше 100 грамм, из-за ряда ограничений может оказаться невозможной установка специальных сенсоров для определения относительного движения. Поэтому в настоящей работе рассматривается задача оценки относительного движения с помощью радиочастотного анализа и/или анализа амплитуд сигналов антенн межспутниковой связи, а также задача уточнения конфигурации роя фемтоспутников [1, 2].

В работе предполагается, что заданное число фемтоспутников запускается на низкой околоземной орбите с помощью 3U-кубсата по схеме запуска как в миссии KickSat-2 (рис.1). Фемтоспутники и кубсат оснащены антеннами межспутниковой связи, позволяющей передавать информацию между аппаратами [3]. Считается, что для антенн известны диаграммы направленности, которые не являются сферическими и не симметричны относительно какого-либо направления. С помощью преобразования Фурье проводится измерение амплитуды сигнала связи между аппаратами. С помощью этих измерений требуется оценить текущий вектор состояния фемтоспутников относительно кубсата, вектор состояния состоит из радиус-вектора, вектора скорости, кватерниона ориентации и вектора угловой скорости.



Рис. 1. Изображение миссии Kicksat-2, запустившей более 100 фемтоспутников.

Для решения поставленной задачи применяется расширенный фильтр Калмана, использующий уравнения относительного движения Хилла-Клохесси-Уитшира и уравнения углового движения Эйлера, а также кинематические соотношения на этапе прогноза вектора состояния. В работе проводится исследование наблюдаемости системы, а также численное исследование точностных характеристик определения относительного движения в зависимости от параметров системы и параметров шумов измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-21-00845.

1. Timmons T. [et al.] “Range-Based Relative Navigation for a Swarm of Centimeter-Scale Femto-Spacecraft”, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 45, No. 9, pp. 1584-1597, 2022.
2. Barnhart D.J. [et al.] “Enabling Space Sensor Networks with PCBSat”, 21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Vol. SSC07-IV-4, 2007.
3. Bakkali M.E. [et al.] “High Gain Miniaturized MPA with MSS for FemtoSat Communications”, Advanced Informatics for Computing Research, pp. 357-369, 2019.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ВЫБОРА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Панькова А.П.², Каменских А.А.¹, Носов Ю.О.³

ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: ¹anna_kamenskih@mail.ru, ²anastasia_pankova@mail.ru, ³ura.4132@yandex.ru

Качественный подбор модели поведения полимерных и композиционных материалов при реализации работы реальной конструкции является актуальной задачей. Данные материалы применяются в большом разнообразии современной промышленности, в частности в узлах трения. Однако, для упрощения реализации рабочих процессов многими учеными-исследователями рассматривается упругое или упругопластическое поведение [1]. Данное упрощение не дает полного описания картины деформационного поведения конструкции в целом и полимерного слоя скольжения в частности.

В работе, в качестве полимерного материала рассматривается модифицированный фторопласт. В качестве вязкоупругой модели поведения была выбрана модель Prony. Для получения коэффициентов, которые требуются для описания вязкоупругого поведения материала, был воспроизведен натурный эксперимент [2] в численной реализации в инженерном программном комплексе Ansys Mechanical APDL.

Для подбора настроек и параметров модели была реализована тестовая задача о контактном взаимодействии индентора и полимерного полупространства через защитно-упрочняющее покрытие (рис. 1).

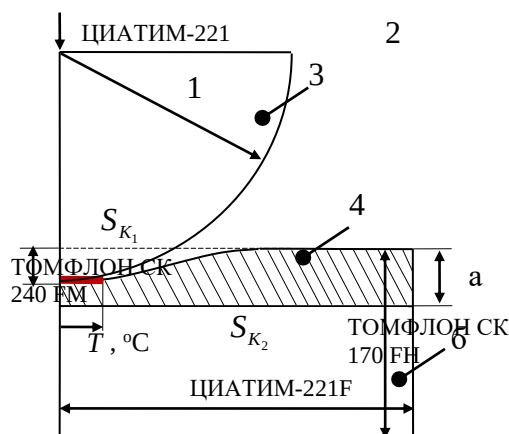


Рис. 1. Контакт полупространства со сферическим индентором с учетом полимерного защитного слоя.

В рамках работы было проведен сравнительный анализ трех моделей поведения: упругой, упругопластической [3], линейной вязкоупругости [4] – при контактном взаимодействии индентора и полимерного полупространства через защитно-упрочняющее покрытие. Влияние описания модели поведения материала антифрикционной полимерной прослойки на деформационное поведение контактных узлов трения было изучено и получены количественные и качественные закономерности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01313.

1. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Strukova V.I. Influence of geometry and configuration of the spherical sliding layer of bridge bearings on the structure working capacity // Computational Continuum Mechanics. – 2021. – Vol. 14, № 3. – P. 289-299.

2. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. // Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург: УрО РАН. 2003. 411 с.

3. Kamenskikh A. A., Trufanov N. A. // Regularities Interaction of Elements Contact Spherical Unit with the Antifrictional Polymeric Interlayer. Friction and Wear. 2015. Т. 36, № 2. Pp. 170-176.

4. Ильюшин А.А. Победра Б.Е. // Основы математической теории термовязко-упругости. Изд-во «Наука». 1970. 281 с.

БИОМЕХАНИКА ЗУБА С УЧЕТОМ КЛИНОВИДНОГО ДЕФЕКТА

Панькова А.П., Каменских А.А., Седельникова С.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

e-mail: anna_kamenskikh@mail.ru

Некариозное поражение зуба вблизи шейки является достаточно распространенным заболеванием зубочелюстной системы в России и мире. Долговечность реставраций клиновидного дефекта с помощью пломбировочных материалов зависит от многих факторов, в том числе и от геометрической конфигурации и глубины дефекта [1]. Существенный вклад в биомеханику и медицину зубочелюстной системы дают исследования, направленные на модификацию геометрической конфигурации реставраций дефекта и новые технологии лечения [2-3]. При этом не теряет актуальность исследования, направленные на влияние геометрии дефекта на работу зуба при сопряжении с зубом антагонистом при стандартных и нестандартных нагрузках, в том числе действующим под углом [4]. В данной работе рассмотрено влияние геометрии клиновидного дефекта при действии нагрузки от зуба-антагониста вертикально и под углом 45° при стандартной реставрации (рис.) композиционными пломбировочными материалами. Геометрия дефекта зависит от радиуса скругления и глубины. При этом рассматриваются дефекты, которые не поражают пульпу.

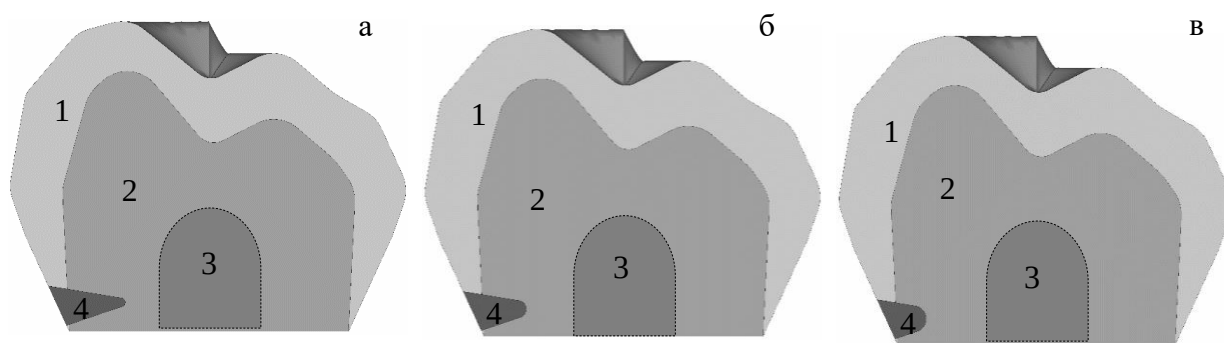


Рис.1. Зуб с реставрацией клиновидного дефекта с использованием стандартной технологии:
а-в – разная геометрическая конфигурация дефекта (угол скругления);
1 – эмаль; 2 – дентин; 3 – пульпа; 4 – протетическая вкладка.

Модель зуба включает корневую систему, которая не показана на рисунке. Нагрузка от зуба антагониста прикладывается в диапазоне от 100 до 1000 Н. В зоне контакта пломбы с зубом реализована полная адгезия (полное прилипание поверхностей сопряжения при любых нагрузках и трении). В рамках исследования получены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния и контакта от уровня нагрузки для двух вариантов композиционных материалов пломбы. Выполнен анализ влияния угла приложения нагрузки от зуба-антагониста на работу биомеханического узла.

1. Sakhabutdinova L., Kamenskikh A.A., Kuchumov A.G., Nosov Y., Baradina I. Numerical study of the mechanical behaviour of wedge-shaped defect filling materials // *Materials*. 2022. Vol. 15. № 20. Art. 7387.
2. Barbosa Kasuya A.V., Favarão I.N., Machado A.C., Rezende Spini P.H., Soares P.V., Fonseca R.B. Development of a fiber-reinforced material for fiber posts: Evaluation of stress distribution, fracture load, and failure mode of restored roots // *The Journal of prosthetic dentistry*. 2020. Vol. 123(6). P. 829-838.
3. Kamenskikh A.A., Sakhabutdinova L., Astashina N., Petrachev A., Nosov Yu. Numerical modeling of a new type of prosthetic restoration for non-carious cervical lesions // *Materials*. 2022. Vol. 15. № 15. Art. 5102.
4. Dikova T., Vasilev T., Hristova V., Panov V. Finite element analysis of V-shaped tooth defects filled with universal nanohybrid composite using incremental technique // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021. Vol. 118. Art. 104425.

ПОВЕДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA ПРИ ОДНОСЛОЙНОМ ЗАЩИТНОМ ПОЛИМЕРНОМ ПОКРЫТИИ

Панькова А.П., Каменских А.А., Лесникова Ю.И., Стражец Ю.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

e-mail: anna_kamenskikh@mail.ru

Специализированные оптические волокна (Panda, Bow-Tie, Elliptical Jacket) представляют собой сложную композиционную конструкцию из стекол с разным легированием, которая позволяет получить поля технологических остаточных напряжений, которые влияют на оптические характеристики волновода [1, 2]. Волокна в зависимости от условий работы и сферы их применения покрываются защитными покрытиями из разных материалов (полимеры, металлы, углероды) [3]. Это позволяет оградить поверхность от химических и механических воздействий, микроизгибов, воздействия влаги и пыли и т.д. Используются, как многослойные, так и однослойные защитные полимерные покрытия [3]. В рамках работы для анализа влияния геометрии защитного покрытия (ЗП) из полимерных материалов созданы модели волокна типа Panda с учетом двухслойного покрытия и однослойного покрытия (рис. 1).

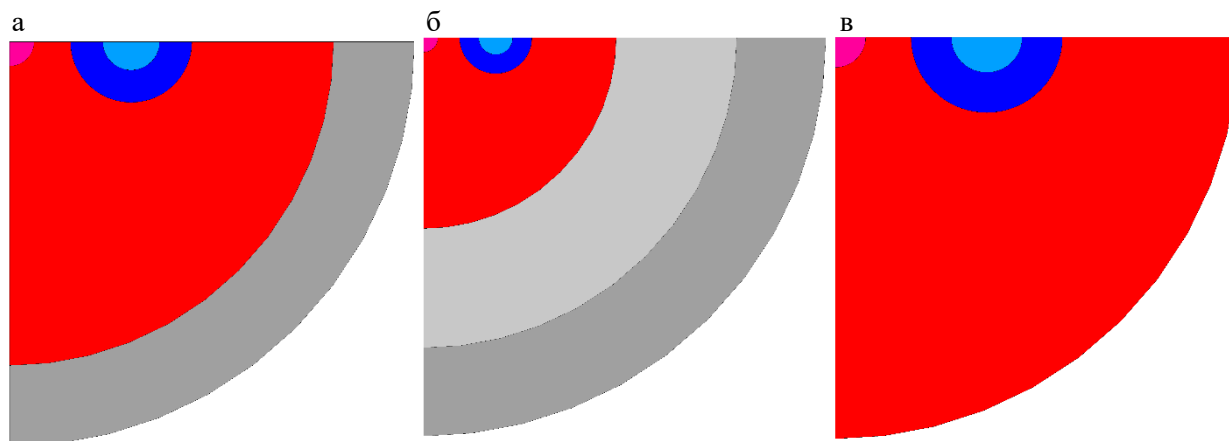


Рис. 1. Оптическое волокно типа Panda: а) однослойное ЗП; б) двухслойное ЗП; в) без ЗП.

В рамках работы исследовано влияние толщины однослойного полимерного покрытия из материала DeSolute DS-2015 на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) и оптические характеристики волокна. Выполнено сравнение параметров НДС и оптических характеристик с моделью, включающей двухслойное полимерное покрытие (внутренний слой – DeSolute 3471-1-152A, внешний слой – DeSolute DS-2015). Рассмотрено влияние учета вязкости материалов полимерных покрытий, полученной в рамках натурных экспериментов [4], на работу конструкции при контакте волокна с металлической поверхностью.

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

1. Guan R., Zhu F., Gan Z., Huang D., Liu S. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers // Optical Fiber Technology. 2005. № 11. P. 240-254.
2. Liu J., Liu Y., Xu T. Analytical estimation of stress-induced birefringence in Panda-type polarization-maintaining fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 2020. Vol. 32. № 24. P. 1507-1510.
3. Мендес А., Морзе Т.Ф. Справочник по специализированным оптическим волокнам: пер. с англ. М.: Техносфера, 2012. 728 с.
4. Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the temperature dependence of the thermal expansion coefficient of polymers // Polymers. 2021. Vol. 13. Art. 3035.
5. Lesnikova Y.I., Trufanov A.N., Kamenskikh A.A. Analysis of the polymer two-layer protective coating impact on Panda-type optical fiber under bending // Polymers. 2022. Vol. 14. Art. 3840.

ГЕМОДИНАМИКА МАЛЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ: ТРЕНДЫ И НОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ НЕЙРОХИРУРГИИ

Тихвинский Д.В.¹, Бервицкий А.В.^{1,2}, Станкевич Ю.А.^{1,3}, Куянова Ю.О.¹, Паршин Д.В.¹

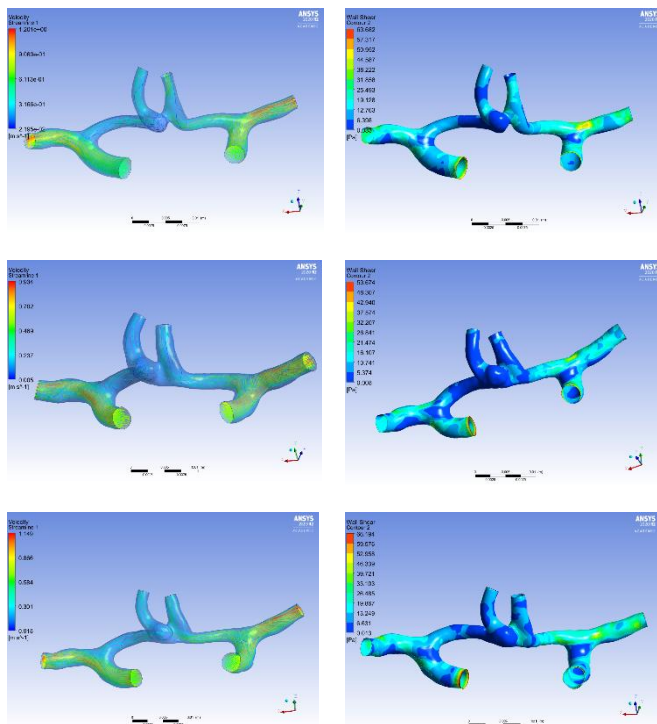
¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» Минздрава России, Новосибирск

³Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

e-mail: parshin@hydro.nsc.ru

Церебральные аневризмы являются одной из наиболее распространенных патологий интракраниальных сосудов и встречаются у 20-50 человек на 1000 населения, а в большей степени распространены именно малые аневризмы [1]. Целью данной работы является выявление закономерностей в морфологических и гемодинамических изменениях малых церебральных аневризм у пациентов в ходе их динамического наблюдения.



По DICOM-изображениям реальных пациентов, проходивших обследование в ФНЦ (Новосибирск) и отказавшихся от оперативного вмешательства, восстановлена структура церебральных сосудов. У больных присутствуют от 2 до 3 исследований за различные годы, что позволило наблюдать динамику изменения как морфологических, так и гидродинамических характеристик этих пациентов. В результате проведенного исследования оказалось, что часть аневризм были констатированы ошибочно в ходе первого исследования и были отвергнуты в ходе последующих исследований. Часть аневризм осталась стабильной (сохранение размеров или рост не более чем на 0.5 мм по одному из измерений). Часть аневризм выросла, причем некоторые существенно! В ходе проведения исследования выяснился интересный факт о репозиции церебральных артерий [2], который прежде не отмечался никем в литературе.

Результаты численного моделирования WSS (Pa) (1-й год наблюдения – верхняя строка, 2-й год – средняя, 3-й – нижняя).

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 20-71-10034 (<https://rscf.ru/project/20-71-10034/>).

1. Ikawa F., Morita A. et al. Rupture risk of small unruptured cerebral aneurysms // J. Neurosurg. 2019. P. 1-10.

2. Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Бервицкий А.В., Обединская Н.Р., Тулупов А.А., Паршин Д.В. Динамическое наблюдение изменения морфологических и гемодинамических характеристик малых церебральных аневризм // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2023. Vol. 12. № 1. P. 172-180.

ДИНАМИКА, НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ПОЛЁТЕ К ГРАВИТАЦИОННОМУ ФОКУСУ СОЛНЦА

Перепах Д.Г.¹, Трофимов С.П.¹, Ширококов М.Г.¹, Корнеев К.Р.¹

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

e-mail: dperepukhov@yandex.ru

Доклад посвящён проблемам динамики, навигации и управления космической миссии к гравитационному фокусу Солнца. Цель миссии – прямое наблюдение экзопланеты с помощью эффекта гравитационного линзирования Солнцем. Эффект заключается в том, что параллельный пучок света, исходящий от экзопланеты, преломляется гравитацией Солнца, в результате чего лучи сходятся в области пространства, называемой гравитационным фокусом Солнца (ГФС), где их интенсивность возрастает до $\sim 10^{11}$ раз [1]. Это позволяет телескопу, расположенному в ГФС, получить изображение экзопланеты с пространственным разрешением несколько километров на пиксель. Столь высокое разрешение, не достижимое с помощью традиционных наземных/космических телескопов, открывает значительные возможности для астрофизики и астробиологии. Однако поместить телескоп в ГФС и там управлять им – задача крайне сложная, так как ГФС расположен очень далеко – начинается на расстоянии 550 астрономических единиц от Солнца, – а требуемая точность позиционирования в ГФС составляет ~ 1 метр. Текущий концепт миссии предполагает близкий пролёт Солнца и разгон с помощью солнечного паруса, что позволяет менее чем за 25 лет доставить в ГФС группировку малых аппаратов [1]. При этом возникают сложные инженерные и математические задачи, в том числе проблема навигации и управления движением в течение полёта к ГФС и работы там.

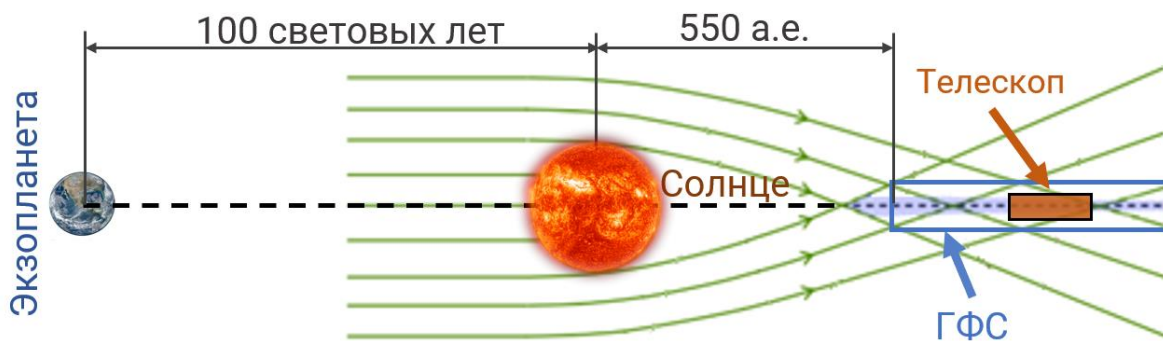


Схема фотографирования экзопланеты с помощью гравитационного линзирования Солнцем.

Приводятся результаты работ по исследованию динамики, навигации и управления на разных этапах миссии к ГФС. Изучена динамика относительного движения аппаратов на близких гиперболических траекториях, выделены несколько типов относительного движения, получены условия его ограниченности [2]; исследована орбитальная динамика в области ГФС, предложены алгоритмы управления, обеспечивающие стабилизацию вблизи оси ГФС [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-11-00256 (<https://rscf.ru/project/22-11-35041/>).

1. Helvajian H. et al. Mission architecture to reach and operate at the focal region of the solar gravitational lens // Journal of Spacecraft and Rockets. 2023. Vol. 60. № 3. P. 829-847.

2. Перепах Д.Г., Трофимов С.П. Относительное движение космических аппаратов на гиперболических траекториях // 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 3-8 апреля 2023 г. Прикладная математика и информатика. Секция динамики и управления движением космических аппаратов.

3. Перепах Д.Г., Ширококов М.Г., Корнеев К.Р. Аспекты динамики, управления и навигации в рамках научного этапа миссии к фокусу гравитационной линзы Солнца // XLVII Академические чтения по космонавтике, Москва, 24-27 января 2023 г. Секция «Прикладная небесная механика и управление движением».

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСТУЩИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРЕЩИН

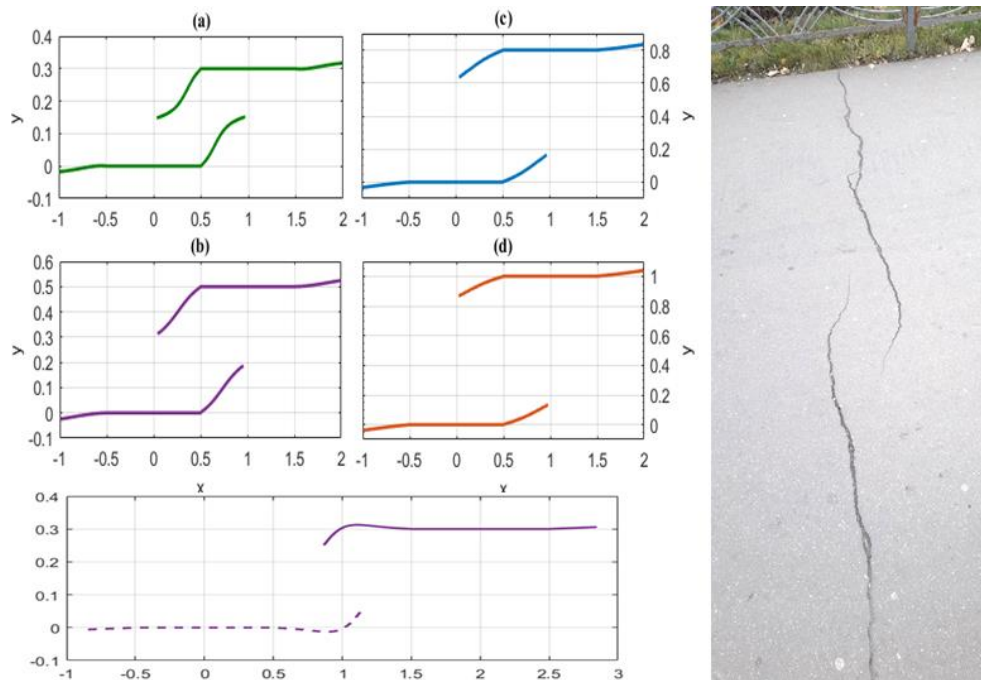
Пестов Д.А.

ФГУ ФНЦ НИИ Системных Исследований РАН, Москва

e-mail: dmitr-ey94@mail.ru

Рост трещин является одним из основных механизмов разрушения конструкций и материалов. Изучение роста трещин происходит с целью либо предотвратить или замедлить их рост, либо с целью направить их рост в нужном направлении. Примерами могут выступать усталостные трещины в механизмах, которые необходимо выявлять до того как они разрушат механизм; резка стекла, в которой контролируемый рост трещин позволяет получить заданную форму разреза; разрезы или перфорация на бумаге, позволяющие обеспечить рост трещины в заданном месте листа; а также трещины гидроразрыва, в которых жидкость под высоким давлением позволяет создать в нефтесодержащем пласте трещину, по которой нефть или газ при добыче будет поступать в скважину гораздо быстрее, чем если бы они фильтровались в неё сквозь породу.

В данной работе внимание уделено не росту отдельной трещины, а тому, как растущие рядом трещины влияют друг на друга, искривляют свои траектории, а также могут объединиться в одну трещину или прекратить рост в одном или обоих направлениях. В работе представлен метод моделирования растущих трещин, с учетом того, что они распространяются криволинейно. С помощью данного метода исследована зависимость того, как ведёт себя система из нескольких трещин в зависимости от их расположения и приложенных нагрузок.



Взаимодействие двух трещин на асфальте и траектории двух изначально параллельных трещин в зависимости от их расположения.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания № 1021061509701-5-1.2.1 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов и горения» (FNEF-2022-0021).

1. Pestov D.A., Shamina A.A., Zvyagin A.V. Investigation of the interaction of rectangular cracks by new numerical simulation methods // Acta Astronautica. 2023. Vol. 204. P. 878-887.

ГЕТЕРОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ УДАРНОГО СЛОЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА ДИССОЦИИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

Погосбекян М.Ю.¹, Крупнов А.А.¹

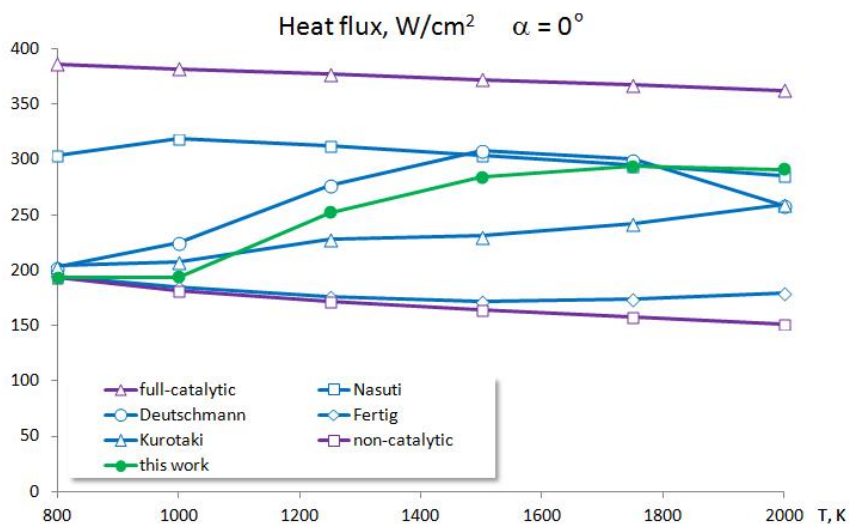
¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: kroupnov@imec.msu.ru, pogosebekian@imec.msu.ru

Гетерогенные процессы играют ключевую роль в определении потоков тепла на поверхность многоразовых космических аппаратов при их входе в атмосферу Земли. Выявление механизмов этих процессов и определение их основных кинетических характеристик имеют решающее значение для эффективного проектирования современных теплозащитных систем. Актуальность исследования свойств теплозащитных покрытий возрастает в связи с разработкой новых материалов для перспективных многоразовых космических аппаратов, нуждающихся в эффективной теплозащите при температуре поверхности около 2000 К.

Разработана замкнутая кинетическая модель взаимодействия диссоциированного воздуха с поверхностью теплозащитного материала SiO₂ (β-кристобалит). Для описания гетерогенных процессов использовался кластерный подход, при котором поверхность материала с кристаллической структурой моделировалась кластером, передающим стехиометрию кристалла и валентные состояния лежащих на поверхности атомов. Поверхность потенциальной энергии рассчитывалась методом теории функционала электронной плотности (DFT) с расширенным гибридным функционалом в сочетании с корреляционным функционалом Ли-Янга-Парра (X3LYP). В качестве базисных функций использовался корреляционно-согласованный поляризованный валентный трехэкспоненциальный базисный набор cc-pVTZ. Константы скоростей элементарных стадий (адсорбция/десорбция, ассоциативная и ударная рекомбинация) получены согласно теории переходного состояния, адаптированной к поверхностным реакциям [1]. Рассчитанные константы скоростей рассматриваемых процессов были аппроксимированы в обобщенной форме Аррениуса в диапазоне температур 500–2200 К.

На основе построенной модели каталитических реакций и ряда феноменологических моделей на поверхности SiO₂ проведен расчет модельной задачи обтекания сферы в рамках приближения вязкого ударного слоя для условий полета соответствующей высоте 60 км и скорости 7.5 км/с для широкого диапазона температур поверхности 500–2000 К. Исследовано влияние отдельных гетерогенных каталитических процессов на структуру и химический состав течения.



Конвективный тепловой поток к поверхности в точке торможения для различных температур T_w : эта работа, феноменологические модели Deutschmann, Nasuti, Kurotaki, Fertig, идеально каталитические и некаталитические граничные условия.

1. Kroupnov A.A., Pogosebekian M.J. Interaction of dissociated air with the surface of β-cristobalite material // Acta Astronautica. 2023. Vol. 203. № 2. P. 454–468.

МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ АНАЛИТА В МИКРОКАНАЛЕ ОКОЛО НАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Пономарев Р.Р.^{1,2}, Ганченко Г.С.¹, Алексеев М.С.¹, Моршинева И.В.², Демехин Е.А.^{1,3}

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

³Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Малые концентрации аналита в исследуемых жидкостях является одной из главных трудностей при проектировании лабораторий на чипах для проведения медицинских и химических анализов [1]. Для решения этой проблемы используют различные ионоселективные поверхности и эффект концентрационной поляризации, который возникает около таких поверхностей под действием электрического поля [2]. Несмотря на успехи в этом направлении [3], особенно экспериментального характера, существует отсутствие полного понимания наблюдаемых физических процессов, приводящих к суперконцентрации, что ограничивает оптимизацию устройства, который практически в неизменном виде рассматривается уже более 15 лет [2, 4].

В докладе будет представлена модель концентрирования аналита около нанофильтрационной мембраны, обладающей ионной селективностью и относительно небольшим гидродинамическим сопротивлением. На основе одномерной модели была получена качественная зависимость степени концентрирования аналита и ионов около таких поверхностей от асимметрии зарядовых чисел и коэффициентов диффузии между ионами аналита и ионами солей. При двумерном моделировании было также учтено электроосмотическое течение, возникающее около заряженных стенок микроканала, а также его конкуренция с потоком электролита, вызванного давлением.

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ № 22-29-00307.

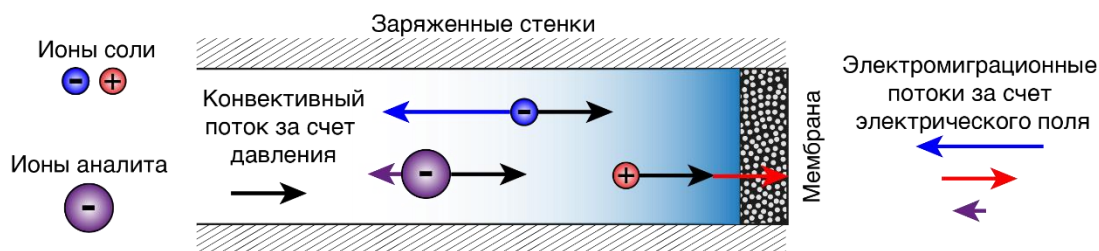


Рис. Схематичное изображение задачи и основных сил, действующих на ионы соли и аналита.

1. McCarthy K.P. et al. An integrated ion-exchange membrane-based microfluidic device for irreversible dissociation and quantification of miRNA from ribonucleoproteins // *Lab on a Chip*. 2022. Vol. 23. № 2. P. 285-294.
2. Wang Y.-C., Stevens A.L., Han J. Million-fold preconcentration of proteins and peptides by nanofluidic filter // *Analytical Chemistry*. 2005. Vol. 77. № 14. P. 4293-4299.
3. Ouyang W. et al. Deciphering ion concentration polarization-based electrokinetic molecular concentration at the micro-nanofluidic interface: theoretical limits and scaling laws // *Nanoscale*. 2018. Vol. 10. № 32. P. 15187-15194.
4. Chen Q. et al. An electrokinetic preconcentration trapping pattern in electromembrane microfluidics // *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. № 9. Art. 092009.

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЭЛЕКТРОФОРЕЗ ИОНΟΣЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ

Попов В.А.^{1,2}, Ганченко Г.С.¹, Гребнев И.И.^{1,2}, Моршнева И.В.², Демехин Е.А.^{1,3}

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

³Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Микрофлюидика, как отдельная научная дисциплина, известна достаточно давно. В своё время на неё возлагали большие надежды в области биотехнологий и проектирования микроустройств медицинской диагностики. Несмотря на определенные успехи [1], микрофлюидика до сих пор не реализовала весь свой потенциал. Особенность рассмотрения биологических жидкостей вызывает необходимость учёта их неньютоновских свойств, в частности вязкоупругих [2].

В докладе будут представлены результаты численного моделирования электрофореза ионоселективной микрочастицы в вязкоупругом электролите, описываемый моделью FENE (Finite Extensible Nonlinear Elastic). Было обнаружено, что даже небольшое количество электронеutralных полимеров может значительно влиять на электроконвективные процессы около ионоселективных микрочастиц. Аналогично тому, как это происходит около плоских ионоселективных поверхностей [3], наличие полимеров интенсифицирует малые вихри и стабилизирует крупные вихри. Таким образом, электроконвективные вихри наблюдаются при меньших напряженностях электрического поля, а неустойчивость концентрационной струи, которая сопровождается отрывом крупного тороидального вихря Духина-Мишук, возникает при больших значениях напряженности, чем при электрофорезе в ньютоновском растворе электролита [4].

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ № 22-79-10085.

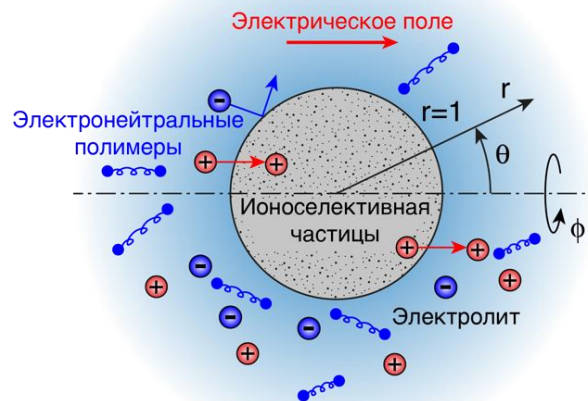


Рис. Схематичное изображение задачи. Постановка осесимметричная.

1. Kumar S. Quantifying PON1 on HDL with nanoparticle-gated electrokinetic membrane sensor for accurate cardiovascular risk assessment // Nature Communications. 2023. Vol. 14. № 1. P. 557.
2. Li G., Archer L.A., Koch D.L. Electroconvection in a viscoelastic electrolyte // Physical Review Letters. 2019. Vol. 122. № 12. Art. 124501.
3. Ganchenko G. et al. Electrokinetic instability in viscoelastic fluids in microgravity conditions // Microgravity Science and Technology. 2022. Vol. 34. № 5. P. 85.
4. Ganchenko G.S. et al. Instabilities, bifurcations, and transition to chaos in electrophoresis of charge-selective microparticle // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32. № 5. Art. 054103.

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА СВЕРХЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

Попович С.С., Здитовец А.Г., Загайнов И.А.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: pss@imec.msu.ru

Тело, движущееся со сверхзвуковой скоростью, испытывает на себе эффект аэродинамического нагрева пропорциональный скорости движения. В то же время при течении сверхзвукового потока в канале, например, аэродинамической трубы, часть внутренней энергии потока преобразуется в кинетическую энергию. В результате термодинамическая температура потока значительно снижается. При этом теплоизолированные стенки канала принимают равновесную температуру стенки – адиабатную температуру, близкую к начальной температуре торможения потока.

В области сверхзвуковых внутренних течений в каналах актуальным представляется учёт при определении теплового потока и коэффициента теплоотдачи локальных изменений определяющей температуры – равновесной (адиабатной) температуры стенки. Как показано в ряде работ [1, 2], погрешность в определении коэффициента теплоотдачи, рассчитанного без учета локальных изменений равновесной температуры стенки, может составлять до 50%. В центре Лэнгли NASA, подводя итоги проведенных за последние 50 лет исследований в области высокоскоростного аэродинамического нагрева [3], отмечают, что дальнейшее повышение точности определения закономерностей теплоотдачи при обтекании сверхзвуковым потоком поверхностей сложной формы требует тщательного исследования локальных значений равновесной температуры стенки.

В рамках работы проводится отработка методов измерения теплового потока в стенку при обтекании ее сверхзвуковым потоком воздуха. Исследования проводятся на сверхзвуковой аэродинамической установке АР-2 с помощью датчиков теплового потока, ИК-камеры и термопар.

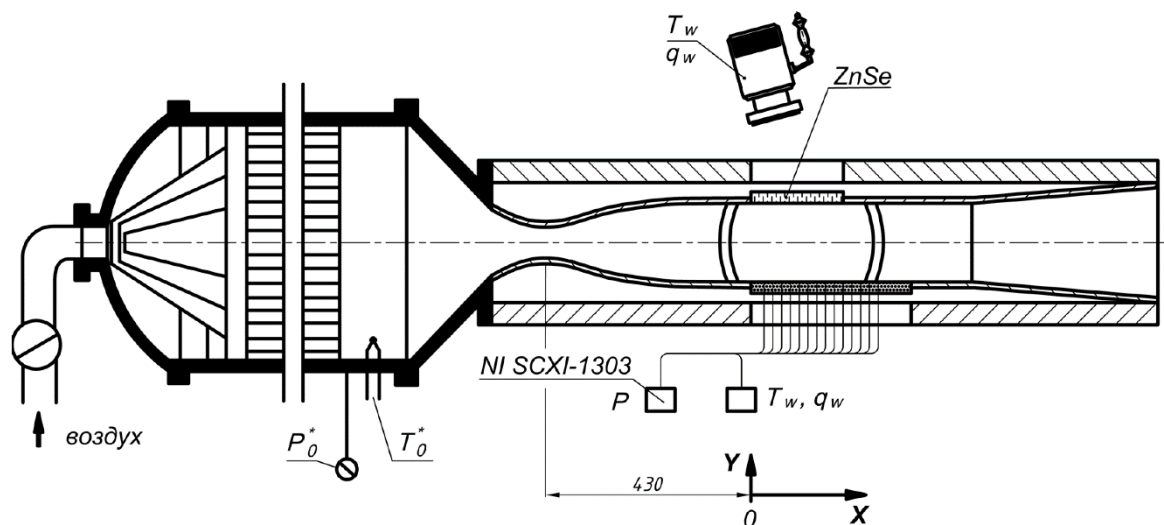


Схема проведения экспериментального исследования.

Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00096.

1. Леонтьев А.И., Лушик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 3. С. 455-480.
2. Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge // Fluid Dynamics. 2022. Vol. 57. № 1. P. 57-64.
3. Neumann R.D., Freeman D.C. Experimental measurement of aerodynamic heating about complex shapes at supersonic Mach numbers // Journal of Spacecraft and Rockets. 2012. Vol. 49. № 6. P. 1080-1087.

PIV ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОГО ТЕЧЕНИЯ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ: ПОПЕРЕЧНОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА

Попович С.С.¹, Здитовец А.Г.¹, Киселёв Н.А.¹, Виноградов Ю.А.¹

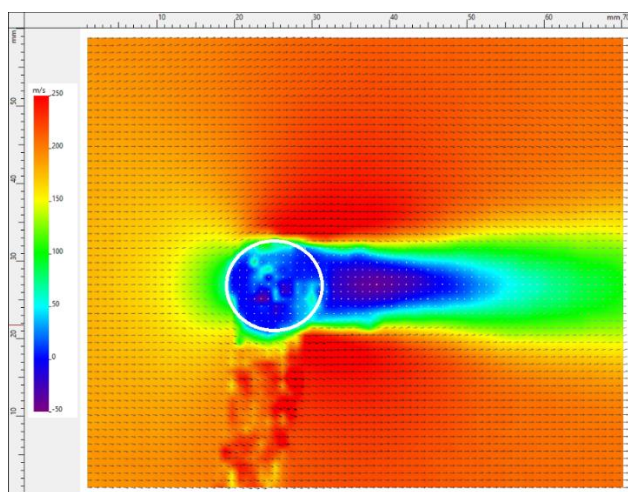
¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Внешние воздействия (градиент давления, проницаемость стенки, 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 [1] снижение адиабатной температуры стенки фиксируется в следе за обтекаемым препятствием в виде клина, ребра или ступеньки.

По-видимому, впервые данный результат был опубликован в работе Хилтона У.Ф. Было отмечено, что температура задней стенки цилиндра практически равняется статической температуре набегающего потока в то время, как в передней части температура близка к температуре торможения [2]. Результат был подтвержден в ряде последующих работ, а также интенсифицирован за счет взаимного влияния пары круговых цилиндров [3].

В данной работе представлены результаты исследования поперечного обтекания цилиндра дозвуковым потоком воздуха, полученные методом PIV (система Полис). Экспериментальное исследование проводится на базе аэродинамической установки АР-2 на стационарном режиме при изменении числа Маха набегающего потока в диапазоне 0.5-0.6.



PIV-визуализация обтекания цилиндра (поток слева направо, подсветка сверху).

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ №19-79-10213.

1. Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge // Fluid Dynamics. 2022. Vol. 57. № 1. P. 57-64.

2. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 3. С. 455-480.

3. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Попович С.С. Экспериментальное исследование энергоразделения при поперечном обтекании пары круговых цилиндров сжимаемым потоком воздуха // Известия РАН. МЖГ. 2023. № 2. С. 102-112.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ПАНОРАМНЫМИ МЕТОДАМИ

Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

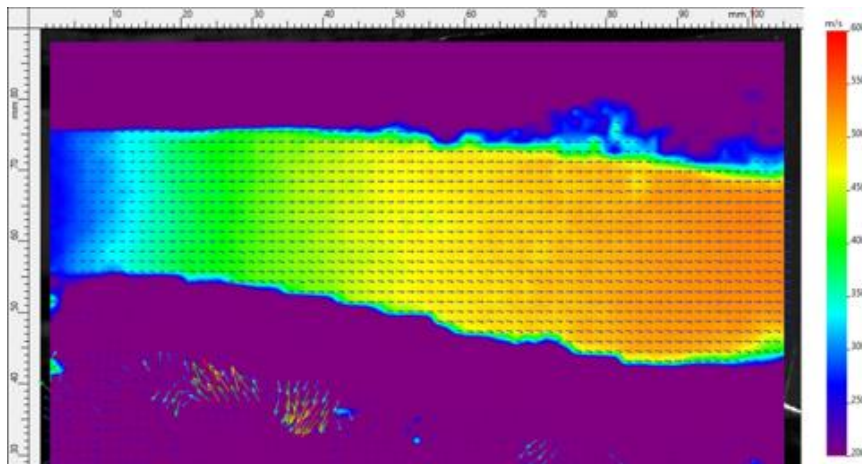
e-mail: pss@imec.msu.ru

Панорамные методы измерений, в отличие от традиционных (термоанемометр, лазерная доплеровская анемометрия и др.), обладают рядом преимуществ. Например, они позволяют измерять мгновенные распределения физических величин, выявлять в потоке когерентные структуры, исследовать нестационарные потоки и быстропротекающие процессы [1]. Наиболее известными среди панорамных методов являются PIV (Particle Image Velocimetry) и SSP (Shadow Photography).

Метод PIV – это оптический метод измерения мгновенных полей скорости газа в выбранном сечении потока. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы – трассеры, взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Скорость потока определяется расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Данный метод находит широкое применение в практике исследований течения газов с высокими сверхзвуковыми скоростями. Первые работы по использованию метода PIV в сжимаемых течениях датируются 1988 г. (Moraitis C.S., Riethmuller M.L., Kompenhans J. et al.), при высоких сверхзвуковых скоростях (больше $M = 4$) публикации начали появляться с 2002 года (Haertig J., Havermann M. et al.).

Метод SSP основан на регистрации теневой фотографии объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей его среды. Цифровой анализ теневого изображения позволяет определить положение и границу объекта, что важно в задачах исследования течения двухфазного потока.

В рамках работы представлено применение 2D2C-PIV (двухмерной двухкомпонентной) и SSP-систем в исследовании задач термогазодинамики сверхзвуковых потоков. Исследования проводятся на сверхзвуковой аэродинамической установке AP-2 [2] в области газодинамики двухфазных (газо-жидкостных) потоков.



Пример PIV-визуализации расширения потока в сопле.

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ.

1. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 125-158.

2. Попович С.С., Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А. Экспериментальное исследование аэрогидродинамики течения воздушно-капельного потока в плоском сверхзвуковом сопле // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика В.Е. Алемасова. АО Информационно-издательский центр Казань, 2023. С. 174–175.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Пузатова (Шаранова) А.В.¹, Дмитриева М.А.¹

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

e-mail: asharanova@kantiana.ru

Работа посвящена развитию экспериментально-теоретического подхода исследования характеристик композиционных бетонов с механоактивацией исходных компонентов. Проведена модификация мелкозернистых бетонных систем путем механической активации отдельных компонентов исходной сухой смеси с целью получения наномодифицирующей добавки. Механическая активация – модификация твердых веществ при механической обработке с созданием в некоторой области твердого тела напряжений с последующей их релаксацией. При этом происходит образование химически более активного вещества за счет разрушения частиц цемента, флокуляционных структур, образования свежих развитых и химически активных поверхностей цемента с высокой реакционной способностью.

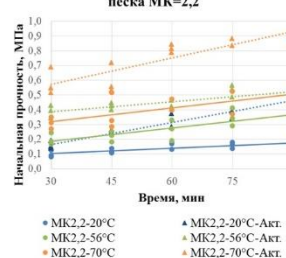
Проведена оценка режима активации исходных компонентов бетонной смеси, выбрано оптимальное соотношение скорости и времени активации. По результатам экспериментальных исследований установлено, что механическая активация бинарной композиции исходных компонентов составов бетонов эффективнее, чем механическая активация отдельных компонентов строительной смеси. Наилучшие результаты наблюдаются при предварительной активации бинарной комбинации цемент+песок строительной смеси [1]. При этом наблюдается сокращение сроков схватывания [1], на ранних сроках твердения наблюдается двукратное увеличение предела прочности образцов бетонов [2].

Определены параметры макрокинетики процессов схватывания бетонных систем, модифицированных механической активацией, путем термомеханических и калориметрических исследований. Экспериментально подтверждена активационная природа процессов гидратации модифицированной бетонной смеси [3]. Полученные значения параметров макрокинетики необходимы для компьютерного моделирования схватывания бетонной смеси с учетом механической активации исходных компонентов.

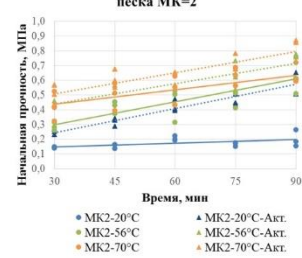
Проведено исследование условий и сроков хранения наномодификатора на его эффективность в качестве модифицирующей добавки путем калориметрического анализа и измерения прочности составов на основе свежеективированной цементно-песчаной смеси, а также после некоторого срока хранения. Результаты экспериментальных исследований демонстрируют высокую сохранность активированной цементно-песчаной добавки при хранении в герметичном контейнере.

Проведено исследование частичной замены исходных компонентов активированной цементно-песчаной композицией. Предложено использование активированной композиции в качестве активной минеральной добавки. Механическая активация способствует раскрытию неиспользованного потенциала исходных компонентов мелкозернистой бетонной смеси. Активная минеральная добавка, полученная путем механической активации цементно-песчаной композиции, может стать альтернативой дорогостоящим добавкам при использовании регионального сырья для ее изготовления.

Кинетика набора прочности на базе песка МК=2,2



Кинетика набора прочности на базе песка МК=2



Уравнение Аррениуса

$$\sigma_T = \frac{A}{C} \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \cdot \varphi(z).$$

Параметры уравнения Аррениуса

Состав	МК2,2	МК2,2-Акт.	МК2	МК2-Акт.
A	0,007	0,007	0,007	0,007
C, МПа	36,7	36,7	31,4	31,4
E _A , Дж/моль	22293	20540	21183	20095

1. Шаранова А.В., Ленкова Д.А., Панфилова А.Д. Влияние механической активации исходных компонентов на механические свойства бетонной смеси // Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х ч.; СПбГАСУ. СПб., 2018. Т. 2. С. 108-114.

2. Sharanova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.A. Formation of the properties of nano-modified concretes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 684. №. 1.

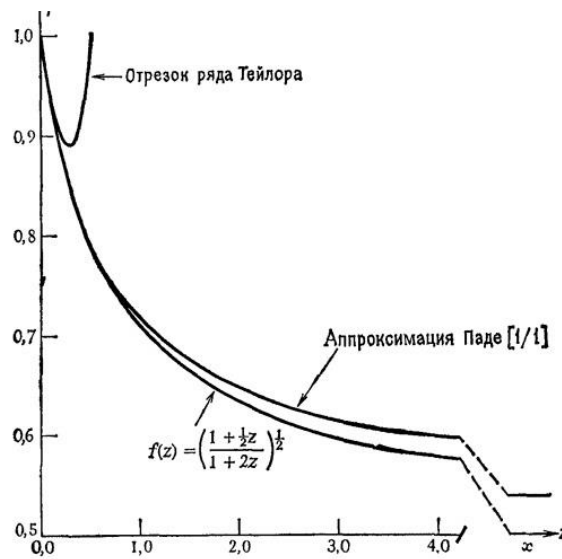
3. Dmitrieva M.A., Leitsin V.N., Sharanova A.V. Computer simulation of the strength processes of mechanically activated concrete mixtures // AIP Conference Proceedings. 2019. Т. 2167. № 1. 020072.

РАЦИОНАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЯДРА СВЕРТКИ РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ В КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Родионов Д.О.¹

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: danila2012r@yandex.ru

Среди большого количества методов построения искусственных граничных условий на открытых границах особое место занимают так называемые прозрачные граничные условия (ПГУ), основанные на преобразовании Лапласа по времени, и аппроксимация ядра свертки полученного точного граничного условия суммой экспонент. В пространстве изображений преобразования Лапласа ей соответствует сумма полюсов, которая после простейших алгебраических преобразований обращается в рациональную функцию [1]. Одним из алгоритмов подбора коэффициентов в данной задаче может быть решение системы линейных уравнений, однако по ряду причин этот метод не всегда является оптимальным. Альтернативой является создание архитектуры нейронной сети, реализующей заданную функцию, суть обучения которой поиск параметров для минимизации некоторого функционала. В общем случае для архитектур с заданным классом функций существование такого решения гарантируется теоремой Цыбенко [2]. В работе представлены результаты применения нейронных сетей для получения рациональной аппроксимации ядра свертки решения волнового уравнения в канале с целью построения прозрачных граничных условий. Оценка эффективности алгоритма проводится на основе метода `scipy.Pade`. Этот алгоритм предназначен для построения аппроксимации Паде с использованием ряда Тейлора посредством решения СЛАУ. В процессе исследования были проанализированы результаты решения в зависимости от порядка многочлена знаменателя, сложности архитектуры, начальных распределений весов, количества итераций обучения. Для одинаковых порядков знаменателей было также проведено сравнение с библиотечным методом `scipy.Pade`, в ходе которого было выяснено, что уже для $n=5$ точность, демонстрируемая нейронной сетью, превосходит вышеуказанный метод более чем в два раза. В дальнейшем планируется провести анализ оптимальной глубины сети и сравнить результаты с другими существующими алгоритмами.



1. Зайцев Н.А. Прозрачные граничные условия для волнового уравнения в канале кругового сечения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2009. №80.
2. Cybenko G.V. Approximation by superpositions of a sigmoidal functions // Mathematics of Control Signals and Systems. 1989. T.2. №4. С. 303 – 314.

СРАВНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ РАСЧЁТА РАЗМЫВА ГРУНТА НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОРАНА В ПЕСЧАНОЙ ПЛОТИНЕ

Романова Д.И.^{1,2}, Кухарский А.В.¹, Васильева Е.С.³

¹Институт системного программирования имени В.П. Иванникова РАН, Москва

²Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

³Институт водных проблем РАН, Москва

e-mail: romanovadi@gmail.com

Проран – это отверстие, образовавшееся в теле земляной плотины при прорыве ее водным потоком. Для моделирования образования прорана используется свободное программное обеспечение REEF3D, решатель avalancheFOAM открытого пакета OpenFOAM и отечественный программный комплекс STREAM 2D CUDA.

Решатель avalancheFoam описывает песчаный грунт как среду Хершеля-Балкли. Предел текучести данной реологической модели позволяет описать стационарное положение плотины при отсутствии воздействия на неё со стороны потока. Граница плотины, а также положение свободной поверхности потока описывается методом Volume of Fluid (VoF). Разрыв (разрушение) плотины происходит в случае, если на границе поток-плотина интенсивность сдвиговых напряжений достигает предельного значения, определяемого прочностью материала плотины.

REEF3D – ПО с открытым исходным кодом для моделирования гидродинамики. REEF3D::CFD решает трехмерное уравнение Навье-Стокса. Для моделирования границы раздела двух фаз используется level set method. Размытие моделируется при помощи уравнений van Rijn, Meyer-Peter Muller или Engelund and Fredsoe.

Отечественный программный комплекс STREAM 2D CUDA, основанный на оригинальном численном алгоритме решения двумерных уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана) на неровном дне, зарегистрирован в Роспатенте. В последней версии этого программного комплекса реализован новый алгоритм, обеспечивающий единственность и высокую точность решения уравнений мелкой воды на участках со сложным рельефом дна и гидротехническими сооружениями, распараллеленный на графическом процессоре NVIDIA с использованием технологии CUDA для ускорения расчетов. Физико-математическая модель развития проранов в грунтовых плотинах в составе STREAM 2D CUDA основана на гидроморфологическом методе численного моделирования развития прорана в плотинах, сложенных однородным и неоднородным грунтом. Модель описывает конвективный перенос частиц грунта потоком с учетом взмыва и осаждения наносов и дополняется диффузионными членами, учитывающими изменение отметок дна во времени на основе известного эффекта поперечного выполаживания подводного откоса. Для надводного откоса тоже выбрана диффузионная модель, которая начинает работать, когда угол сухого откоса превышает угол предельной устойчивости.

В качестве объекта моделирования рассматривается экспериментальная плотина из песчаных грунтов, показанная на рисунке.

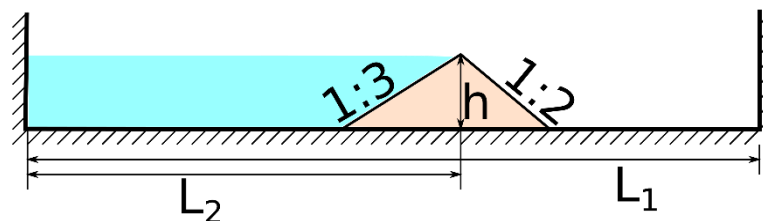


Схема экспериментальной установки для исследования образования прорана в плотине из песчаных грунтов.

Длина экспериментальной установки L_1 составляет 25 м. Расстояние L_2 составляет 15 м. Высота плотины h составляет 0,6 м.

По результатам моделирования выполнялось сопоставление расчётных гидродинамических параметров и экспериментальных. Сравнивались гидрографы расхода в проране и на выходе из лотка, уровни воды в бьефах, изменение максимальной ширины раскрытия прорана во времени. Полученные результаты позволили провести сравнение различных пакетов для расчёта размыва грунта, выявить их достоинства и недостатки.

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ КАРТ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ СОБЫТИЙ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

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

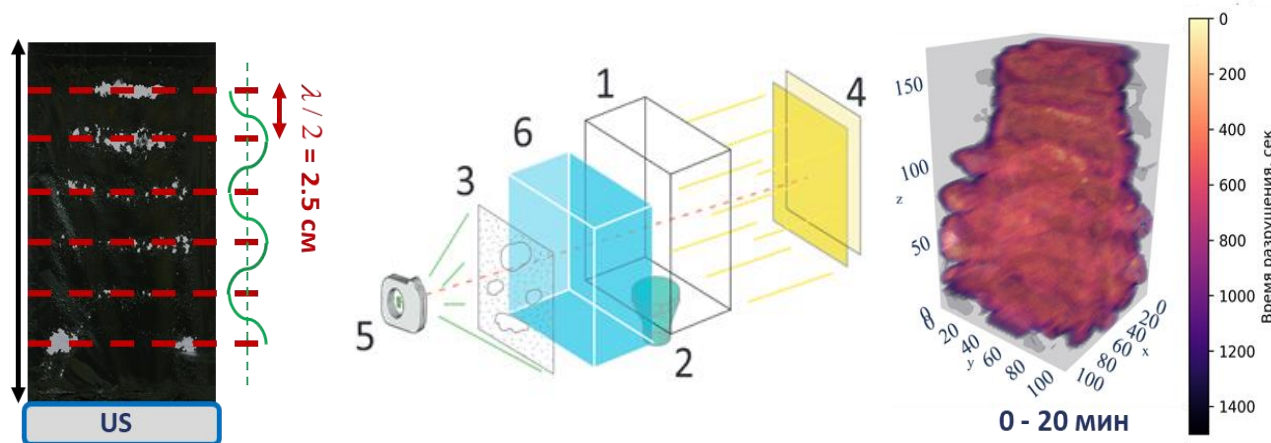
¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

e-mail: k.rybkin@gmail.com

Визуализация кавитационной активности с применением теста фольгой (foil test) является стандартным способом визуализации интенсивности кавитационных событий в сонохимическом реакторе [1]. Этим методом визуально регистрируется процесс эрозии фольги по областям с наибольшим количеством повреждений и определяется распределение кавитационной активности внутри сонохимического реактора [2].

Тепловые карты являются наглядным способом представления данных для временной и трехмерной пространственной динамики всевозможных процессов, поэтому их использование эффективно для развития метода foil test при визуализации активности кавитационных событий в лабораторных исследованиях. Цель настоящей работы состоит в обработке методом тепловых карт данных, полученных с помощью модифицированного метода теста фольгой, для случая трехмерного картирования объема сонохимического реактора, заполненного растворами соли NaCl и ПАВ SDS, а также при наличии газовых включений.



Слева - экспериментальная фотография поверхности фольги с зонами активного разрушения; по центру – экспериментальная установка; справа - тепловая 3D - карта разрушения фольги.

Для проведения эксперимента была изготовлена лабораторная установка, включающая кювету из акрилового стекла (1), фольгу (3), натянутую на пластиковую рамку и источник УЗ (2); в качестве рабочей жидкости использовалась очищенная водопроводная вода (6). Для регистрации областей разрушения фольги применялись цифровая камера (5) и контрольный источник освещения (4). В результате получался набор фотографий, соответствующий одному вертикальному срезу реактора, обрабатываемый с использованием алгоритма на Python. Аналогичный эксперимент проводился и для следующего среза на расстоянии 10 мм, что позволило построить 3D-карту разрушений.

В результате исследования разработан метод регистрации кавитационной активности на основе разрушения фольги, а визуализация с использованием тепловых карт позволила проследить за временной динамикой кавитационной активности в центральной области сонохимического реактора.

1. Tangsopa W., Thongsri J. Development of an industrial ultrasonic cleaning tank based on harmonic response analysis // Ultrasonics. 2019. T. 91. C. 68-76.

2. Yuan B., Jiang Y., Zhu L. Study on the processing methods of aluminum foil measurement signals for ultrasonic cleaning parameters // 2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation. IEEE, 2011. C. 1180-1183.

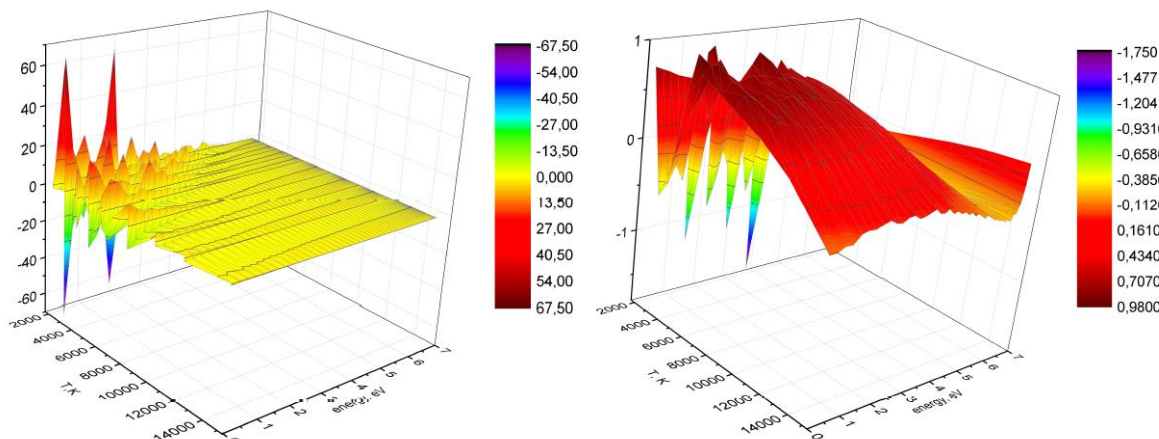
РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ НЕРАВНОВЕСНОГО ВКЛАДА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПОУРОВНЕВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Савельев А.С.

¹Математико-механический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург

e-mail: aleksey.schumacher@gmail.com

При решении задач неравновесной газовой динамики применяются различные по своей точности и вычислительной сложности подходы: однотемпературная, многотемпературная и поуровневая кинетические модели, методы прямого статистического моделирования. В кинетической теории газов наиболее детальным методом является поуровневое представление, основанное на описании энергетических состояний атомов и молекул, их взаимодействий и переходов энергий. Для описания вклада химических реакций существуют различные модели: Марона-Тринора, Алиата, Старика [1]. Но все подходы имеют определенные недостатки: одни модели учитывают энергетическое состояние только распадающейся молекулы, другие не учитывают приоритетный порядок протекания реакций из высоких энергетических состояний. В предыдущих исследованиях была представлена формула, выведенная на основе модели Кнаба, объединяющая в себе преимущества указанных моделей и устраняющая их недостатки [2]. Так же было показано, что все перечисленные модели являются частными случаями предложенной, определены оптимальные значения параметров модели для большинства основных реакций в воздухе [2]. Показано (смотри рисунок), что предложенная модель и набор ее параметров обеспечивают отличное согласование с траекторными расчетами.



Относительная ошибка вычисления поуровневых коэффициентов скорости реакции $\text{NO} + \text{N}$ как функция от колебательного уровня NO и температуры. Данные QCT (слева) и наши расчеты (справа).

Для определения нормирующего множителя необходимо вычислять экспоненты от полного декартового произведения всех энергетических состояний участников реакции. Даже для компонент воздуха это миллионы значений для каждой температуры. По этой причине особый интерес представляет поиск способов упрощения вычислений без потери точности.

Одним из таких подходов является использование алгоритмов машинного обучения. Альтернативным способом служит использование методов нелинейного регрессионного анализа, которые позволяют построить приближение к рассматриваемой величине с использованием комбинации элементарных функций. В рамках данной работы представлены результаты для реакций диссоциации в воздухе с учетом только колебательного возбуждения реагента, проведено сравнение с результатами точного вычисления и результатами, полученными методами машинного обучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке СПбГУ (НИР «Машинное обучение в задачах неравновесной аэромеханики», id проекта 94034084).

1. E.V. Kustova, A.S. Savelev, A.A. Lukasheva Refinement of State-Resolved Models for Chemical Kinetics Using the Data of Trajectory Calculations // Fluid Dynamics. 2022. V. 57. P. S46-S56.

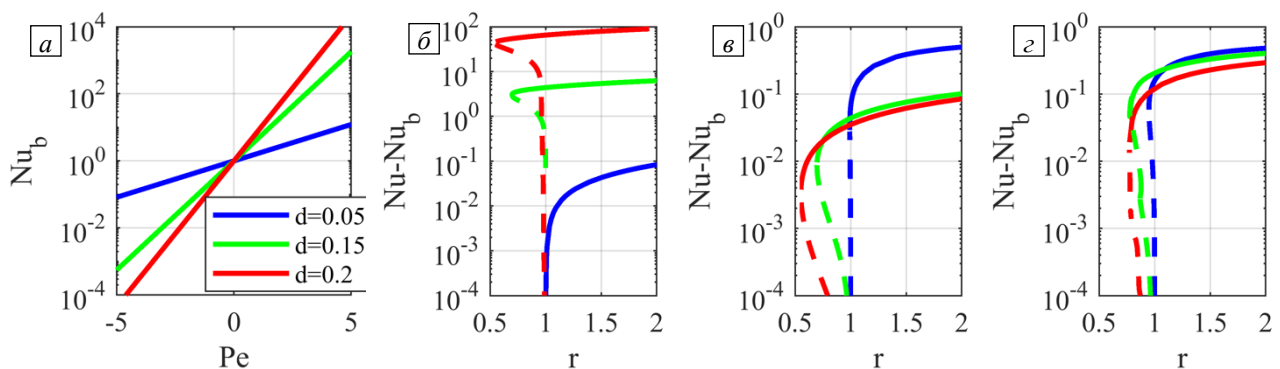
2. E Kustova and A Savelev. Generalized model for state-resolved chemical reaction rate coefficients in high-temperature air // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V.1959. 012033.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПОТОКА ПОСРЕДСТВОМ ОТНОШЕНИЯ ТОЛЩИН ПОДСЛОЕВ И СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ «ВОЗДУХ – ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ ПОРИСТАЯ СРЕДА»

Сагитов Р.В.¹, Колчанова Е.А.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
e-mail: sagitovrv@mail.ru, kolchanovaea@gmail.com

Рассматривается задача о конвективном теплопереносе в системе, образованной двумя горизонтальными подслоями и ограниченной сверху и снизу твердыми проницаемыми плоскостями, на которых поддерживаются одинаковые температуры, и находящейся в условиях плоскопараллельного вертикального сквозного течения в поле тяжести. Нижний подслой содержит тепловыделяющую пористую среду, насыщенную воздухом. Верхний подслой заполнен только воздухом. Задача допускает аналитическое решение, соответствующее сквозному течению, названное основным и определяющее в явном виде температуру в подслоях [1].



Зависимости числа Нуссельта от числа Пекле основного течения (а) и отклонение числа Нуссельта в зависимости от надкритичности при отношении толщин воздушного и пористого подслоев при $d = 0.05$, $d = 0.15$, $d = 0.2$ и числах Пекле $Pe = 5$ (б), $Pe = -5$ (в), $Pe = -6$ (з). Штриховые линии соответствуют неустойчивым конвективным режимам, сплошные линии – устойчивым.

Число Нуссельта Nu для различных режимов течений определяется как отношение плотности полного теплового потока через границу между пористым и воздушным подслоями к плотности теплового потока за счет теплопроводности через эту же границу. При восходящем течении ($Pe > 0$) число Нуссельта Nu_b для основного течения растет, а при нисходящем течении ($Pe < 0$) – уменьшается с ростом скорости течения. Построены зависимости отклонения числа Нуссельта Nu при наличии валиковой конвекции на фоне основного вертикального течения от числа Нуссельта Nu_b в ее отсутствие от надкритичности γ при различных соотношениях толщин подслоев и различных значениях числа Пекле, пропорционального скорости основного течения. В случае восходящего основного течения или в его отсутствие с увеличением отношения толщин воздушного и пористого подслоев растет тепловой поток из пористого подслоя в воздушный. В случае увеличения скорости восходящего основного, происходит рост теплопереноса из пористого в воздушный подслой. При достаточно большом отношении толщин подслоев или слабом нисходящем течении на его фоне реализуется конвективные вали, преимущественно локализованные в воздушном подслое. Увеличение скорости нисходящего течения приводит к уменьшению теплового потока из пористого подслоя в воздушный. При сравнительно малой относительной толщине воздушного подслоя или сильном нисходящем течении реализуются стационарные крупномасштабные конвективные режимы, охватывающие оба подслоя, которые на порядок повышают тепловой поток по сравнению с его значением при конвективных валах, локализованных преимущественно в воздушном подслое.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045/>.

1. Kolchanova E., Sagitov R. Throughflow effect on local and large-scale penetrative convection in superposed air-porous layer with internal heat source depending on solid fraction // Microgravity Science and Technology. 2022. V. 34. N. 52. doi: 10.1007/s12217-022-09971-2

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДРЕЙФ И КОАЛЕСЦЕНЦИЮ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ПАВ

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

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

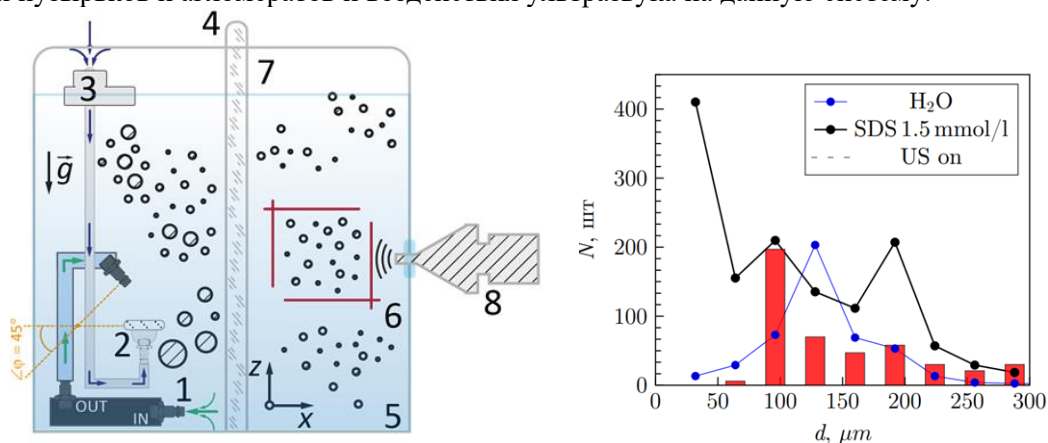
² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

e-mail: anastasiia3006@mail.ru

Одним из способов генерации пузырьков различных размеров является использование мелкодисперсной мембраны. Применение данного метода в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) позволяет регулировать размеры и количество воздушных пузырьков в широких диапазонах значений [1].

Использование ультразвука (УЗ) является одним из видов внешнего воздействия, способных оказывать влияние на исследуемую систему [2]. В работах исследователей большое внимание уделяется действию стоячих УЗ волн на воздушные пузырьки. Под действием сил Бьеркнеса происходит процесс агрегации пузырьков и возникновение агломератов, дрейфующих в узлах и пучностях стоячей акустической волны [3].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании генерации воздушных пузырьков с помощью асимметрично смачиваемой мембраны в водных растворах ПАВ, изучении динамики пузырьков и агломератов и воздействия ультразвука на данную систему.



Слева – экспериментальная установка; справа – график распределения по диаметру пузырька при воздействии ультразвука на систему при концентрации SDS 1.5 ммоль/л.

Экспериментальная установка, представленная на рисунке слева, включала в себя кювету из акрилового стекла толщиной 3 мм, асимметрично смачиваемую кварцевую мембрану, воздушный компрессор и водяной насос, который создавал сдвиговый поток жидкости, срывающий с поверхности мембраны воздушные пузырьки. В экспериментах применялись водные растворы ПАВ sodium dodecyl sulfate (SDS). Для регистрации пузырьков использовалась камера с контрольным источником света.

Проведенные исследования позволили изучить процесс дрейфа пузырьков и агломератов в растворах ПАВ под действием УЗ, выявить зависимость диаметра и количества воздушных пузырьков, генерируемых вышеописанным способом, от различной концентрации SDS, а при фиксированной концентрации ПАВ от времени и режима УЗ воздействия. Результаты измерений представлены на графике, расположенном справа.

1. Rybkin K. et al. Method of generation, measurement of the size and number of microbubbles in NaCl and SDS solutions of different concentrations //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. T. 2317. №. 1. C. 012007.

2. Chen Y. et al. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation //Ultrasonics sonochemistry. 2020. T. 60. C. 104739.

3. Jin L. et al. Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles //Ultrasonics Sonochemistry. 2021.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ФАЗОВУЮ СТРУКТУРУ РАЗРЫВНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ СМЕСЕВЫХ ПОЛИМЕРОВ ПЛА-ПБАТ

Селезнева Л.Д.^{1,2}, Попов А.А.^{1,2}, Трофимчук Е.С.^{1,3}

¹РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва

²ИБХФ им. Эммануэля, Москва

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: seleznyova.ludmila@yandex.ru

В работе приведены данные, описывающие структуру и механические свойства перспективных биоразлагаемых полимерных материалов [1]. Изучены пленки на основе полилактида (ПЛА) и полибутиленадипинаттерефталата (ПБАТ) толщиной 300 ± 50 мкм (Рис.1). Состав композиций: от ПЛА до ПБАТ с шагом в 10 массовых частей.

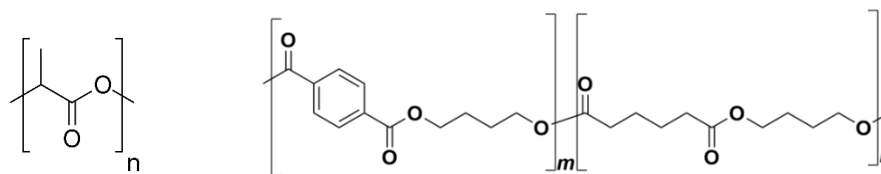


Рис.1. Структурные формулы ПЛА и ПБАТ.

Влияние добавки ПБАТ к ПЛА на разрывную деформацию указано на Рис. 2. Введение ПБАТ в матрицу ПЛА на начальном этапе способствует увеличению разрывного удлинения в 2 раза. При содержании ПБАТ от 30 до 70% каждый компонент представляет собой большие области непрерывной фазы. Это приводит к значительному снижению физико-механических свойств и охрупчиванию смесевых пленок.

При добавлении 10% ПЛА к ПБАТ происходит снижение разрывного удлинения в 2 раза с 1000 по 545, которое практически сохраняется до 20% добавки ПЛА. Это указывает на то, что в данном диапазоне составов дисперсионную среду формирует ПБАТ, а фазу включения – ПЛА. Дальнейшее увеличение содержания ПЛА до 30% приводит к обращению фаз с формированием самостоятельной непрерывной структуры каждым компонентом.

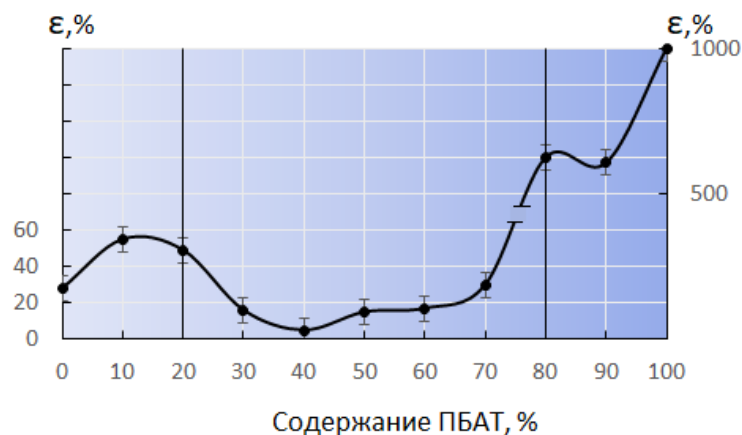


Рис.2. Зависимость разрывной деформации от состава компонентов ПЛА и ПБАТ для исходных образцов.

По результатам физико-механических испытаний можно судить о структуре пленок на основе ПЛА-ПБАТ и подобрать оптимальный состав для получения материалов с заданными свойствами.

1. Селезнева Л.Д., Попов А.А., Аншин С.М. Влияние факторов окружающей среды на структуру и свойства смесей полилактида (ПЛА) и полибутиленадипинаттерефталата (ПБАТ) // конф. «Биохимическая физика 2022».

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Стамов Л.И., Тюренкова В.В., Никитин В.Ф.

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», Москва
e-mail: lyubens@mail.ru

В работе проведено трехмерное вычислительное моделирование процессов, происходящих в камере сгорания гибридного твердотопливного двигателя при воспламенении твердого горючего. В качестве окислителя рассматриваются предварительно подогретый газообразный кислород и воздух, которые подаются в камеру сгорания со сверхзвуковой скоростью. Твердое топливо представляет собой НТРВ (полибутадиен с концевыми гидроксильными группами) или РММА (полиметилметакрилат) для двух различных экспериментальных камер. Предполагается, что при взаимодействии окислителя с топливом, оно начинает прогреваться. В результате чего начинают выделяться составляющие компоненты твердого топлива, которые взаимодействуют с окислителем и также воспламеняются. Параметры тепло- и массообмена около термохимически разрушающегося горючего определяются с помощью пристеночных функций по данным вычислительного моделирования параметров среды около твердой поверхности. Для моделирования был разработан специализированный авторский программный код. Некоторые детали используемых в работе моделей и алгоритмов могут быть найдены в работах [1-3].

Для корректировки модели проведено сравнение результатов вычислительного моделирования по скорости выгорания твердого топлива с данными физических экспериментов из работ [4, 5]. Проведена серия тестовых вычислительных экспериментов по определению распределений физических параметров внутри камеры сгорания. После установления протекающих в камере сгорания процессов пары топлива располагаются только между поверхности твердого топлива и зоной реакций. За ней по центру области присутствуют лишь окислитель и продукты горения. Такое развитие процессов характерно для диффузионного режима горения. До стабилизации процессов в камере сгорания получены сильная турбулентность и асимметрия происходящих в камере процессов.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на выполнение государственного задания № 1021061509701-5-1.2.1 «Разработка алгоритмической компоновки и программ для расчета многомасштабных процессов и горения» (FNEF-2022-0021).

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук за предоставленные вычислительные ресурсы.

1. Kushnirenko A.G., Stamov L.I., Tyurenkova V.V., Smirnova M.N., Mikhilchenko E.V. Three-dimensional numerical modeling of a rocket engine with solid fuel // Acta Astronautica. 2021. Vol. 181. P. 544–551.

2. Tyurenkova V.V., Stamov L.I. Flame propagation in weightlessness above the burning surface of material // Acta Astronautica. 2019. Vol. 159. P. 342–348.

3. Tyurenkova V.V., Smirnova M.N. Material combustion in oxidant flows: Self-similar solutions // Acta Astronautica. 2016. Vol. 120. P. 129–137.

4. Ben-Yakar A., Natan B., Gany A. Investigation of a solid fuel scramjet combustor // J. Propuls. Power. 1998. Vol. 14 (4). P. 447–455.

5. Sun Xingliang, Tian Hui, Li Yuelong, Yu Nanjia, Cai Guobiao. Regression rate behaviors of HTPB-based propellant combinations for hybrid rocket motor // Acta Astronautica. 2016. Vol. 119. P. 137–146.

ЯВЛЕНИЕ УДВОЕНИЯ ПЕРИОДА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ

Старцев Н.И.^{1,2}, Никитин Н.В.²

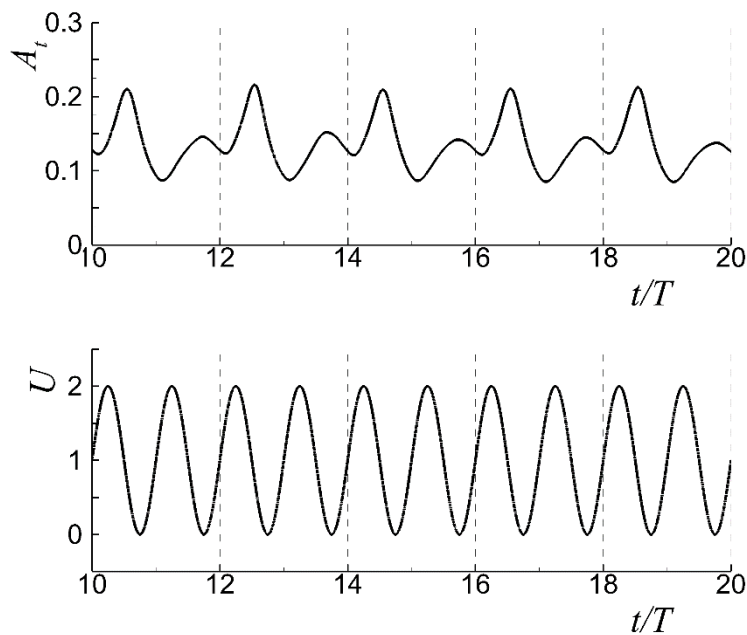
¹ Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

e-mail: startsev.nikolay00@gmail.com

Проведено численное исследование пульсирующего турбулентного течения в трубе квадратного сечения при $\beta=1$ (β – относительная амплитуда осцилляций расхода) и нескольких значениях числа Рейнольдса от $Re=4400$ до $Re=8000$. При варьировании периода осцилляций уравнения Навье-Стокса решаются с начальным условием, соответствующем мгновенному полю скорости предварительно рассчитанного стационарного (непульсирующего) турбулентного течения при рассматриваемом числе Рейнольдса [1]. При значении параметра $\beta=1$ расход меняется во времени от 0 до 2 (в единицах среднего за период расхода), таким образом, на определённых фазах движения средняя скорость близка к нулю. В этих условиях можно ожидать, что при стремлении частоты осцилляций расхода к нулю, когда течение становится квазистационарным, турбулентный режим не сможет сохраняться, и течение перейдёт в ламинарное. Это предположение было подтверждено расчётами.

При приближении периода осцилляций (T) к критическому, при котором наступает реламинизация потока, обнаружено, что турбулентные характеристики ведут себя периодически во времени, но с периодом, дважды превышающим период осцилляций расхода (рис.). То есть возникает эффект удвоения периода [2]. Определены свойства течений с удвоенным периодом при изменении числа Рейнольдса и варьировании размера расчётной области (длины трубы).



Изменение со временем амплитуды турбулентных флуктуаций скорости (сверху) и расхода (снизу):
 $Re=4410$, $T = 40$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-21-00184 с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

1. Никитин Н.В., Попеленская Н.В. Турбулентные пульсирующие течения в трубе квадратного сечения // Изв РАН МЖГ. 2023. № 2. С. 55–71.

2. Nikitin N., Startsev N. Doubling the period in a turbulent pulsating flow // J. Fluid Mech. Submitted.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ

Стеклов Е.С., Ереев М.Н., Соловьев С.А., Патрушев В. Л., Барашков С.А.

АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ», Нижний Новгород

e-mail: steklov_es@okbm.nnov.ru

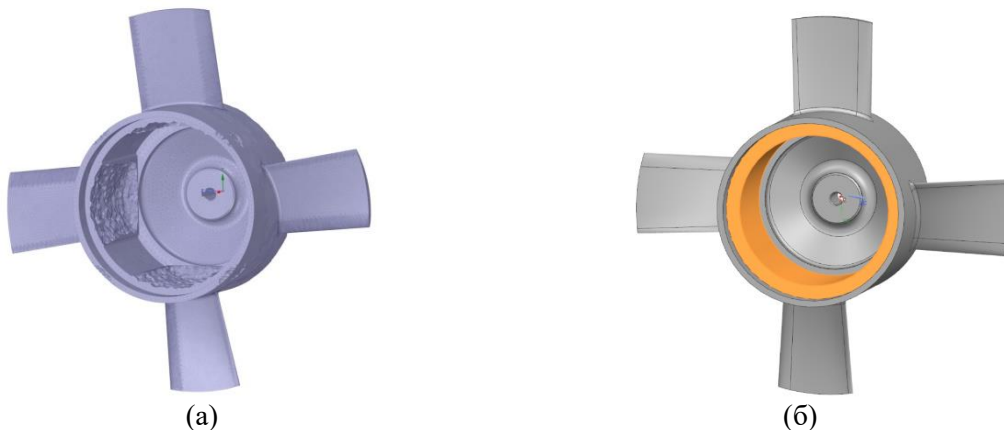
В настоящее время существуют несколько оптимизационных подходов, позволяющих обеспечить для проектируемых деталей характеристики и работоспособность в условиях имеющихся ограничений. Компоновка, общий вид деталей часто выбирается конструктором на основе ранее полученного опыта, либо по примеру уже существующих в отрасли аналогов, доказавших свою работоспособность. Для механического оборудования атомной промышленности существенной характеристикой является вес деталей.

Целью исследования является оптимизация колеса рабочего вентилятора системы охлаждения. Методом компьютерного моделирования разработаны цифровые 3D конструкторская геометрическая и расчетная модели рабочего колеса. Основными действующими нагрузками на элементы рабочего колеса, учитываемых при проведении оптимизации, являются центробежные силы, напор, крутящий момент, внешнее вибрационное воздействие, сейсмическое воздействие. Критерием оптимизации задано уменьшение массы рабочего колеса с выполнением условий прочности: статической, циклической, вибропрочности.

Одним из способов определения рациональной формы детали, обеспечивающей наилучшие весовые характеристики при заданных внешних воздействиях и известных свойствах материала, является подход, основанный на алгоритмах топологической оптимизации. Особенность метода – получение величины, отвечающей за наличие или отсутствие материала в расчетной области («псевдоплотность»). «Псевдоплотность» принимает значение от нуля до единицы, где «0» - полное отсутствие материала, «1» - полное заполнение материалом расчетной области.

Вторым способом является многопараметрическая оптимизация по поверхности отклика, когда сначала определяются значения целевой функции в некоторых заданных точках, а последующая параметрическая оптимизация выполняется для аппроксимированной целевой функции.

В результате исследований с использованием двух технологий оптимизации получены два конечных варианта рабочего колеса оптимизированной конструкции, имеющих сниженную на 20% массу. Оптимизированные конструкции рабочего колеса: топологическая в коммерческом ПО и параметрическая в отечественном ПО приведены соответственно на рисунках (а) и (б).



Оптимизированная конструкция рабочего колеса топологическим (а) и параметрическим (б) методами.

Исходя из анализа полученных результатов использование каждого из двух подходов следует проводить исходя из конструктивных особенностей сборочных единиц, деталей (сплошное тело, сплошная конструкция, трубопровод, гостированные профили). А использование совместно различных методов оптимизации и различных назначаемых критериев (масса, напряжение, деформация собственные частоты колебаний) позволяет получать более эффективный результат и наиболее оптимальную конструкцию.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОСТИ

Суменков О.Ю.

Научно-технологический университет “Сириус”, Сочи
e-mail: sumenkov.oy@learn.siriusuniversity.ru

В данной работе обсуждается проблема идентификации кинематических параметров манипулятора с целью повышения абсолютной точности позиционирования. Классическое представление Денавита-Хартенберга имеет фундаментальные ограничения, в связи с чем рассматривалось оригинальное описание кинематики [1] с использованием элементов теории групп Ли. Данное представление в силу своей природы обеспечивает непрерывность преобразования прямой кинематики по вариациям кинематических параметров.

В большинстве научных трудов по данной тематике используется полный вектор состояния инструмента, который формируется на основании внешних измерительных установок. Для этого случая известны явные выражения якобиана уравнений кинематики по параметрам, разработаны специализированные методы для работы с нелинейной моделью и так далее.

В данной работе представлен авторский метод калибровки [2] (физические нюансы реализации на рис. а), который не подразумевает использования высокоточных измерительных устройств, а лишь ограничение в виде одной или нескольких плоскостей, однако при этом обеспечивает существенное увеличение точности. Получены аналитические соотношения, соответствующие данному типу калибровки, для нелинейной модели сформулирована и решена задача оптимизации.

Важным шагом в процедуре калибровки, влияющем на сходимость численных методов, является выбор подходящего набора конфигурационных координат, которые бы обеспечили оптимальность соответствующих статистических критериев на этапе планирования эксперимента.

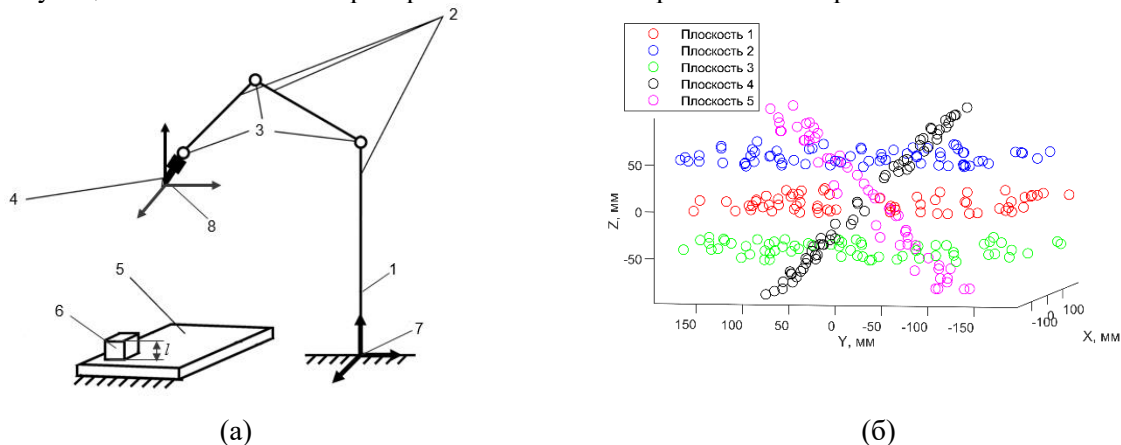


Схема для калибровки с помощью плоскостей: (а) 1 – многостепенный роботизированный манипулятор; 2 – звенья роботизированного манипулятора; 3 – сочленения; 4 – токопроводящий инструмент; 5 – токопроводящая плоская поверхность; 6 – токопроводящий элемент; 7 – первая система координат; 8 – вторая система координат.

(б) Пример генерации калибровочных точек (конец инструмента).

Проведен численный эксперимент, основанный на модели реального манипулятора, который моделировал каждый этап калибровки: поиск подходящих конфигураций плоскости и манипулятора, генерацию выбранных данных с шумами, идентификацию кинематических параметров, валидацию полученных результатов. Результат моделирования подтверждает предлагаемую концепцию калибровки.

1. Brockett R.W. Robotic manipulators and the product of exponentials formula // Mathematical Theory of Networks and Systems / ed. by P.A. Fuhrmann. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984. — P. 120–129.

2. Заявка на патент № 2022135189 Российская Федерация. Система и способ калибровки кинематических параметров роботизированного манипулятора: заявл. 29.12.2022 / Кульминский Д.Д., Суменков О.Ю., Гусев С.В; заявитель АНО ВО НТУ “Сириус”.

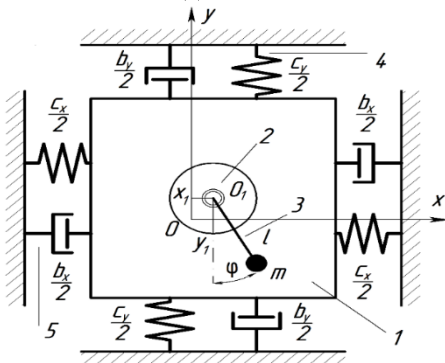
ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА «ЗАСТРЕВАНИЯ» МАЯНИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Суменков О.Ю.

Научно-технологический университет «Сириус», Сочи

e-mail: sumenkov.oy@learn.siriusuniversity.ru

Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию эффекта «застревания» маятника [1] на вращающемся валу механической системы. Суть этого эффекта заключается в том, что при определенном соотношении между моментом трения в опоре маятника, установленного с возможностью свободного вращения на валу ротора двигателя механической системы, и его массой или длиной имеет место такой режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, а угловая скорость (частота вращения) маятника совпадает с одной из собственных частот механической системы. В связи с этим возникает вопрос, а можно ли, используя этот эффект, определять собственные частоты колебаний механических систем и какие параметры влияют на возникновение данного явления.



Механическая система с маятником, вращающимся на валу двигателя, установленного в корпусе.

Исследования проводились на модели с двумя степенями свободы и маятником, установленном с возможностью свободного вращения на валу этой механической системы. Для данной модели с маятником получены нелинейные дифференциальные уравнения неразрешенные относительно старших производных. В результате численного интегрирования этих уравнений построены законы вращения маятника при разных его массах и коэффициентах трения в его опоре, позволяющие получить области существования эффекта «застревания» маятника на собственных частотах модели. Однако, численные эксперименты показали, что не всегда это явление зависит от инерционных характеристик маятника, а также от коэффициента трения в его опоре.

Другим способом анализа вышеуказанного эффекта явился вывод приближенного дифференциального уравнения движения маятника на вращающемся валу модели. Это уравнение было получено при допущении малости углового ускорения по сравнению с квадратом угловой скорости и применения операции усреднения.

$$ml^2\ddot{\varphi} + f(\dot{\varphi} - \omega) = -\frac{mlhn_x\dot{\varphi}^5}{(k_1^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_x^2\dot{\varphi}^2} - \frac{mlhn_y\dot{\varphi}^5}{(k_2^2 - \dot{\varphi}^2)^2 + 4n_y^2\dot{\varphi}^2} \text{ где}$$

$h = \frac{ml}{M+m}$, $2n_x = \frac{b_x}{M+m}$, $2n_y = \frac{b_y}{M+m}$, $k_1^2 = \frac{c_x}{M+m}$, $k_2^2 = \frac{c_y}{M+m}$, f — коэффициент сопротивления относительно движению маятника на валу.

Из этого уравнения наглядно можно увидеть, что на вращение маятника на валу механической системы и соответственно на возникновение эффекта «застревания» помимо инерционных характеристик маятника, коэффициента трения [2] влияет демпфирование механической системы. Расчетные кривые законов разгона маятника, при численном интегрировании системы уравнений модели и отдельно уравнения маятника дали показали хорошее совпадение, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. Проведено исследование влияния демпфирования на возможность возникновения эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу.

1. Артюнин А.И., Жаров В.П. Новый эффект в нелинейной механике. Межвузовский сборник научных трудов. Механика деформированного твердого тела. Ростов-на-Дону. – 1992. – с.3-11.

2. Artyunin A.I., Eliseev S.V., Sumenkov O.Y. Experimental Studies on Influence of Natural Frequencies of Oscillations of Mechanical system on Angular Velocity of Pendulum on Rotating Shaft. Lecture Notes in Mechanical Engineering ICIE – 2018: Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. – 2018.– pp.159-166.

ИМПУЛЬСНОЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТЕНКУ С ПРИЛЕГАЮЩИМ К НЕЙ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМ ПУЗЫРЕМ ГАЗА ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Сутырин О.Г., Сиренко А.Г.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: sutyurin@imec.msu.ru

На основе уравнений Эйлера проведено численное моделирование взаимодействия ударной волны с эллипсоидальным газовым пузырем повышенной плотности вблизи твердой стенки в плоской и осесимметричной постановках. Применяется конечно-разностная схема Маккормака с монотонизатором Жмакина-Фурсенко. Описана газодинамика преломления падающей ударной волны и фокусировки поперечных и отражающихся от стенки скачков уплотнения. Показано, что наличие эллипсоидального пристеночного пузыря газа повышенной плотности многократно увеличивает импульсную нагрузку на стенку, оказываемую падающей на неё ударной волной. Обнаружено, что в зависимости от формы пузыря – параметра удлинения χ – реализуются качественно различные режимы течения, в которых фокусировка волны на оси симметрии происходит до или после начала отражения прошедшей по пузырю волны от стенки. Исследована сеточная сходимость различных мер импульсного ударно-волнового воздействия на стенку – пикового давления и интегральных импульсов избыточного давления – и определена их зависимость от формы пузыря. Импульс избыточного давления, в особенности при осреднении по небольшой области вблизи центра стенки, демонстрирует гораздо лучшую сеточную сходимость, чем пиковое давление. Наибольший импульс давления достигается для слегка сплюснутых в направлении движения ударной волны пузырей, обеспечивающих быстрое последовательное сжатие газа вблизи центра стенки в плоском и цилиндрическом скачках уплотнения.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00307).

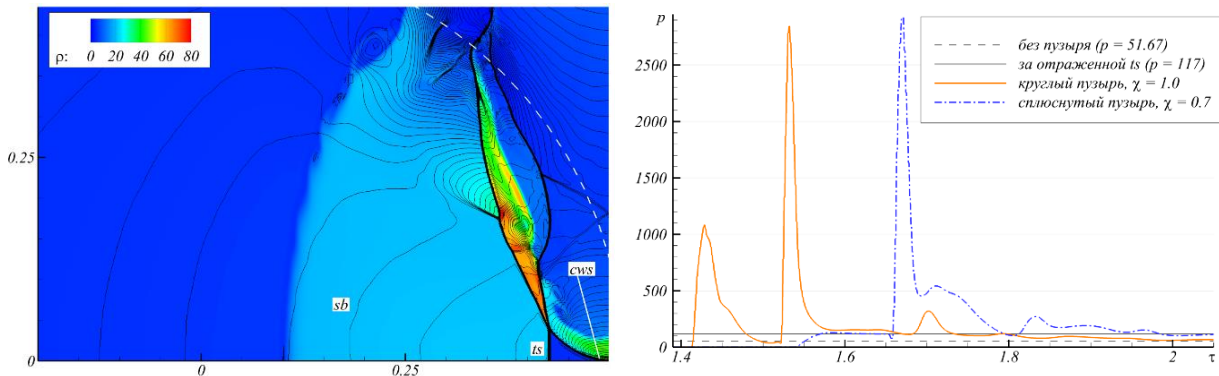


Рис. 1. Слева: фокусировка поперечной волны cws на оси симметрии (нижний край рисунка) до прихода продольной волны ts на стенку (правый край рисунка), цветовое поле плотности, изолинии давления. Пунктирная линия – исходная граница пузыря. Справа: типичная зависимость давления p в центральной точке стенки от безразмерного времени τ для двух режимов взаимодействия. Горизонтальными линиями показаны значения давления за невозмущенной отраженной волной («без пузыря») и за отраженной волной ts (плоский слой газа вместо пузыря).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ СТРАТЕГИИ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

Сыпченко И.М.^{1,2}

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

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

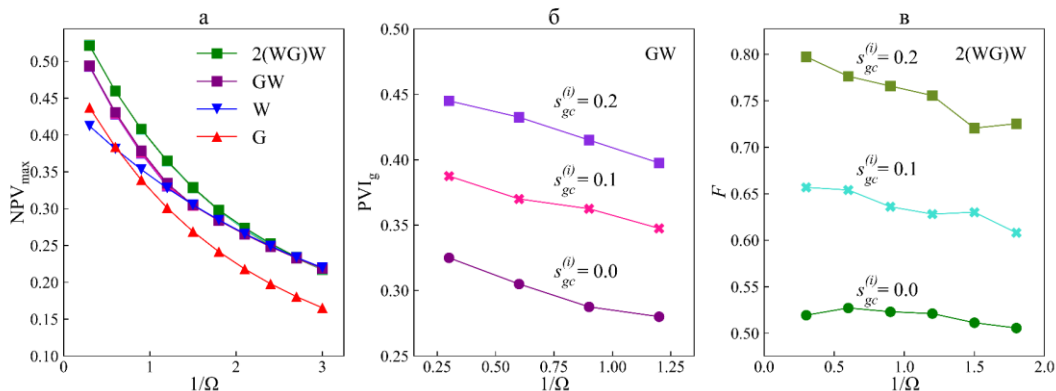
e-mail: sypchenko123@yandex.ru

Рассмотрена одномерная задача трехфазной многокомпонентной фильтрации, связанная с вытеснением нефти углекислым газом и/или водой. Водогазовое воздействие на нефтяные пласты способствуют более эффективному вытеснению нефти. Попеременная закачка газа и воды в нефтенасыщенный пласт приводит к увеличению и уменьшению насыщенности газа. В результате такого процесса может наблюдаться гистерезис относительной фазовой проницаемости газа. В связи с этим явлением была построена численная модель фильтрационного течения с учетом гистерезиса относительной фазовой проницаемости газа и фазовых превращений между фазами нефти и газа. Механическая модель сопряжена с оценкой экономической эффективности водогазового воздействия на нефтенасыщенный пласт.

Проведена оценка рентабельности четырех стратегий водогазового воздействия на основе введенного экономического критерия. Для этого проведены серии расчетов без учета и с учетом влияния гистерезиса для следующих стратегий: газ (G), вода (W), газ-вода (GW) и вода-газ-вода-газ-вода (2(WG)W). На этапе обработки результатов учитывались объемы закачиваемых газа и воды, значения максимальной прибыли и водогазовое отношение.

Было показано, что в расчетах с учетом влияния гистерезиса необходимое количество закачиваемого газа возрастало с возрастанием критической насыщенности газа, в то время как значение максимальной прибыли менялось слабо. При уменьшении безразмерной скорости Ω рентабельность всех стратегий снижается, а стратегии водогазового воздействия становятся менее эффективными в сравнении с заводнением пласта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 19-71-10051, <https://rscf.ru/project/19-71-10051/>.



Чистая приведенная стоимость (а), объем закачанного CO_2 (б) и водогазовое отношение (в) в оптимальных стратегиях в зависимости от обратного значения безразмерной скорости $1/\Omega$.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ОБРАЗЦА ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

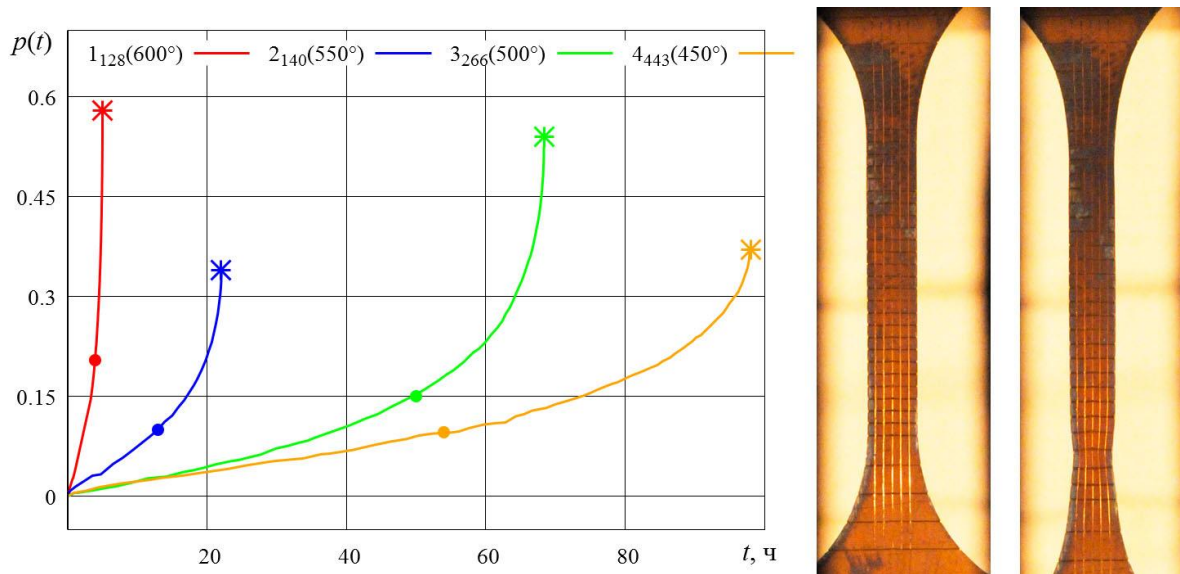
Терауд В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: ldrnww@gmail.com

Исследование деформаций плоских образцов посвящено множество исследований. Особое направление таких исследований составляют работы о локализации деформаций. Исследование момента и условий образования локализации деформаций ползучести посвящено множество иностранных работ, но в российских изданиях проблема локализации освещена плохо.

Проведено исследование ползучести образцов титанового сплава ВТ-6 при растяжении в продольной плоскости. Особенностью этих испытаний является их проведение при различных температурах и напряжениях. Температуры испытаний составили: при 450°C, 500°C, 550°C и 600°C. Длительности испытаний составили от нескольких часов до нескольких недель. Начальная рабочая длина образцов – 25 мм, ширина – 5 мм, толщина 1 мм. Испытания проводились при различных значениях начальных растягивающих напряжениях σ_0 , достигающихся постоянной растягивающей силой и различными температурами T в испытаниях. Исследования проведены в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова.

На рисунке показаны зависимости деформаций ползучести $p(t)$ от времени. Точками обозначены моменты локализации, звездочками – момент разрушения, в скобках даны температуры испытаний, нижний индекс у номера эксперимента – начальное растягивающее напряжение. Моменты локализации найдены из экспериментальных исследований на основе критерия Ω_5 . Например, для эксперимента №2 и №4 момент локализации располагается почти в середине жизненного цикла образца, что существенно различается с принятым мнением об образовании шейки непосредственно перед разрушением. Справа на рисунке показан деформированный образец: образец в момент образования локализации и незадолго до разрушения.



Деформации ползучести $p(t)$ от времени. Образец №2 в момент растяжения.

При рассмотрении полученных данных при одинаковой температуре, но различных начальных растягивающих напряжениях, можно заключить, что момент локализации появляется раньше при более длительном эксперименте (меньше начальное напряжение растяжения). При этом с повышением напряжения растяжения – время до локализации деформаций уменьшается на 5-10%.

При рассмотрении полученных данных при различных температурах, но одинаковых начальных напряжениях можно заключить, что момент локализации смещается к моменту разрушения при понижении температуры. При этом с повышением температуры время локализации уменьшается более существенно и составляет в среднем на 10-25% меньше.

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Титова А.В.^{1,2}, Измоленов В.В.^{1,2,3}

¹Институт космических исследований РАН, Москва

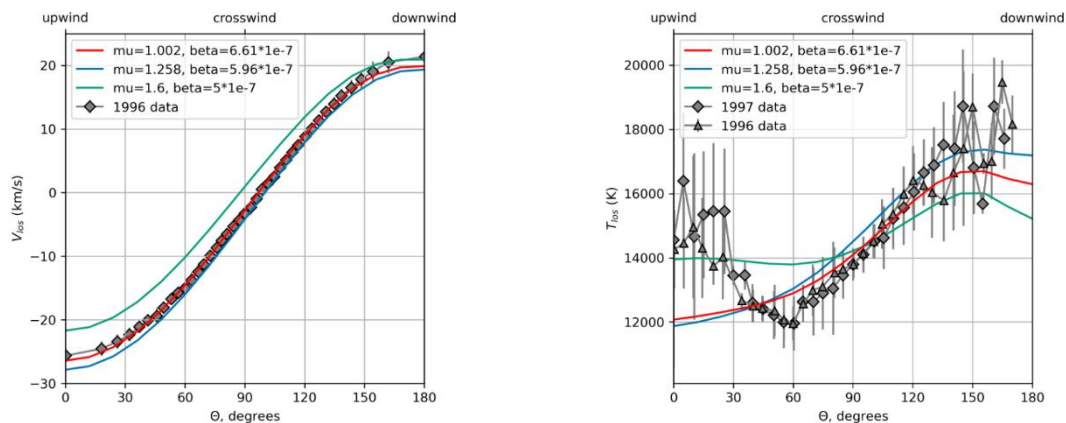
²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

³Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: avtitova1@yandex.ru

Наша Солнечная система движется сквозь межзвездную среду, чья нейтральная компонента состоит преимущественно из атомов водорода. В результате взаимодействия сверхзвукового солнечного ветра (потока ионизированных частиц с верхних областей короны Солнца) с межзвездной средой образуется сложная структура, называемая гелиосферой. Поскольку солнечный ветер и межзвездная среда движутся со сверхзвуковыми скоростями навстречу друг другу, их взаимодействие происходит с образованием головной и гелиосферной ударных волн и поверхности раздела – гелиопаузы [1]. Межзвездные атомы водорода имеют достаточно большую длину свободного пробега и могут проникать внутрь гелиосферы. Изучение свойств подобных атомов могло бы дать нам много новой информации о параметрах межзвездной среды и области ударного слоя.

К сожалению, детектировать межзвездные атомы водорода напрямую проблематично ввиду малости их энергии (несколько эВ). Однако их можно наблюдать косвенно с помощью рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. Солнце излучает Лайман-альфа фотоны (длина волны 1215.67 Å), которые рассеиваются на межзвездных атомах. Параметры рассеянного фотона будут зависеть от функции распределения атомов водорода [2].



Сравнение модельных кривых с наблюдательными данными: а) лучевая скорость, б) ширина линии

В работе представлено моделирование движения межзвездных атомов водорода в поле сил гравитационного притяжения и радиационного солнечного давления, и принимающий во внимание потерю частиц за счет перезарядки на протонах солнечного ветра и фотоионизации. Так как атомы имеют длину пробега сравнимую с характерным размером задачи, для решения используется кинетический подход. Решение будет зависеть от двух параметров: μ – отношения силы радиационного давления к силе гравитационного притяжения и β – частоты ионизации на орбите Земли. Указанный метод позволяет находить функцию распределения межзвездных атомов по скоростям и ее моменты (концентрацию, среднюю скорость и температуру) в гелиосфере. Далее на основе полученных функций распределения вычисляется спектр рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения и его моменты (суммарная интенсивность, доплеровский сдвиг, ширина линии). Результаты сравниваются с наблюдательными данными прибора SOHO/SWAN.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00383.

1. D. Alexashov, V. Izmodenov, Kinetic vs. multi-fluid models of H atoms in the heliospheric interface: a comparison // A&A, 2005, 439, 1171-1181
2. O. Katushkina, V. Izmodenov, Spectral properties of backscattered solar Ly- α radiation in the heliosphere: A search for heliospheric boundary effects // Advances in Space Research, 2011, 48, 12, 1967-1979.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И ОБЪЁМА ВНУТРИПРОСВЕТНОГО ТРОМБА НА МЕХАНИКУ АНЕВРИЗМЫ БРЮШНОЙ АОРТЫ

Тихвинский Д.В.¹, Мержоева Л.Р.¹, Карпенко А.А.¹, Чупахин А.П.¹, Паршин Д.В.¹

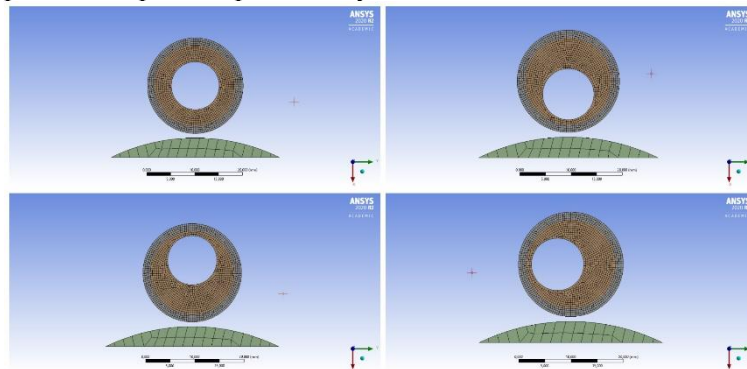
¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

e-mail: nabster98@yandex.ru

Аневризма брюшной аорты - широко распространенное заболевание: от 1,5% до 5% людей старше 65 лет имеют эту патологию [1]. Целью данного исследования было изучение влияния различных вариантов формы и объёма тромбомасс на механику стенки аневризмы.

По DICOM-изображениям реальных пациентов, проходивших лечение в НМИЦ им. Е.Н.Мешалкина, были восстановлены 76 геометрий аорты. Эти данные были использованы для нахождения диаметров аневризмы аорты и подвздошных артерий, а также их статистического анализа. Для моделирования различных вариантов расположения тромбомасс были построены 32 идеализированные 2D конфигурации аневризмы аорты с тромбом, учитывающие объём и геометрию просвета.

В результате проведенного исследования оказалось, что реальное распределение диаметров проксимального, по отношению к аневризме, отдела аорты и диаметров подвздошных артерий отличается от предсказанного по закону Мюррея [2]. Было получено примерное значение степени в законе Мюррея, которое подтверждает ранее полученные нашим коллективом данные [3].



Различные варианты расположения тромбомасс в просвете аневризмы аорты.

Разработан эффективный метод построения центральной линии персонифицированной аорты с аневризмой, который может использоваться для быстрого определения типа внутрипросветного тромба. Результаты численного моделирования соотносятся с результатами ультразвукового мониторинга: максимальные деформации в любых рассмотренных конфигурациях тромбомасс для внутренней выстилки тромба превосходят деформации стенки аневризмы в абсолютной величине. Также для всех случаев асимметрично-расположенного тромба возникает ситуация, когда при заполненности просвета аневризмы тромбом между 60% и 80% величины максимальных деформации стенки тромба и аневризмы меняются местами. Полученные результаты являются основой для дальнейшего изучения влияния тромбомасс на механику стенки аневризмы аорты. Результаты данной работы планируется включить в специальное программное обеспечение для улучшения работы хирургов.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 21-15-00091 (<https://rscf.ru/project/21-15-00091/>).

1. Wanhainen A, et al., European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2019 Clinical Practice Guidelines on the Management of Abdominal Aorto-iliac Artery Aneurysms// European Journal of Vascular and Endovascular Surgery (2018).

2. Zheng, X. et al. Bio-inspired Murray materials for mass transfer and activity. Nat. Commun. 8, 14921

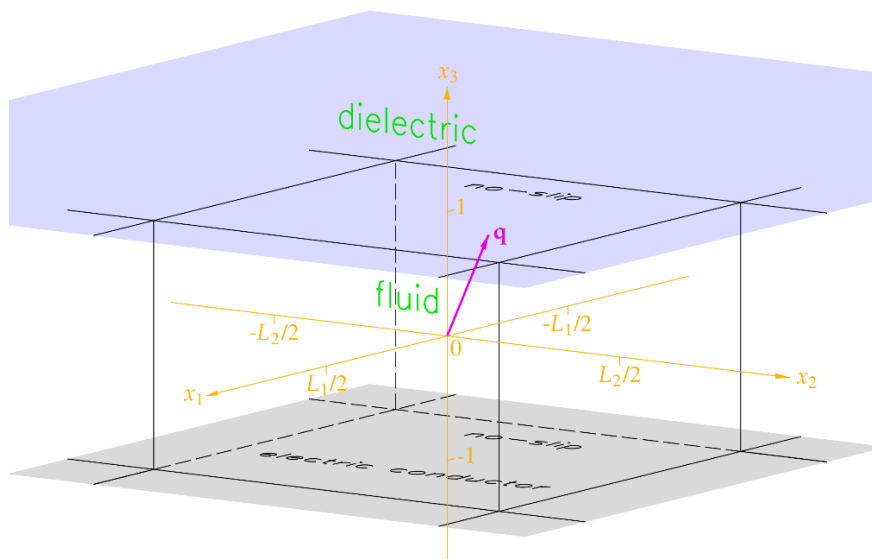
3. Tikhvinskii, Denis V. et.al."Computational analysis of the impact of aortic bifurcation geometry to AAA haemodynamics" Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, vol. 37, no. 5, 2022, pp. 311-329.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО КОНВЕКТИВНОГО МАГНИТНОГО ДИНАМО ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ СЛОЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Толмачев Д.С.¹

¹ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН
e-mail: tolmachev@mitp.ru

В работе исследуется генерация магнитного поля тепловой конвекцией в плоском горизонтальном слое жидкости, вращающемся вокруг наклонной оси [1]. Процесс описывается следующими уравнениями: Навье-Стокса с силами Архимеда, Кориолиса и Лоренца, теплопроводности и магнитной индукции. Соленоидальные векторные поля (магнитное поле и поле скорости жидкости) разложены в сумму полоидального, тороидального и среднего полей, и выведена система уравнений для их потенциалов. Для ее численного решения использован метод Галеркина с разложением по базисным функциям, удовлетворяющим соответствующим граничным условиям. Эти функции имеют вид произведений гармоник Фурье горизонтальных декартовых переменных и линейных комбинаций полиномов Чебышева вертикальной переменной, что обеспечивает повышенную точность аппроксимации у границ слоя жидкости. Неортогональность использованных базисных функций потребовала разработать оригинальные методы расчета коэффициентов разложения по таким базисам с максимальной точностью. Для вычисления произведений используются псевдоспектральные методы [2]. Для интегрирования по времени полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений применяется метод Рунге-Кутты с экспоненциальным дифференцированием 3 порядка [3] (выбор этого метода интегрирования связан с жесткостью системы уравнений для коэффициентов разложений).



Иллюстративная схема физического процесса:

Над верхней границей слоя расположен бесконечный слой диэлектрика, нижняя граница – идеальный проводник. На горизонтальных границах выполнены условия прилипания. Выполнены условия периодичности по горизонтальным декартовым переменным. Слой жидкости вращается вокруг оси, направленной вдоль вектора $\mathbf{q}$. Декартова система координат (показана оранжевым цветом) вращается вместе с жидкостью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-17-00114 “Вычислительные задачи геофизической магнитогидродинамики”.

1. Tolmachev D., Chertovskih R., Zheligovsky V. Algorithmic Aspects of Simulation of Magnetic Field Generation by Thermal Convection in a Plane Layer of Fluid // Mathematics. 2023. Т. 11. № 4. 808.

2. Stellmach S., Hansen U. An efficient spectral method for the simulation of dynamos in Cartesian geometry and its implementation on massively parallel computers // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. Т. 9. № 5.

3. Cox S. M., Matthews P. C. Exponential Time Differencing for Stiff Systems // Journal of Computational Physics. 2002. Т. 176. № 2. С. 430–455.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ДИФфуЗОРНЫМ И КОНфуЗОРНЫМ КАНАЛАМИ

Трифонов В.В., Решмин А.И., Тепловодский С.Х.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: trifonov@imec.msu.ru

Проведены численные и экспериментальные исследования течений в кольцевом и коническом каналах переменного сечения. Течение предполагается непрерывным, поэтому учитываются только малые углы наклона стенок канала. Для чисел Рейнольдса в диапазоне 1000-10000 рассчитаны профили скорости, энергии турбулентности, напряжений Рейнольдса и определяемые ими характеристики турбулентного теплообмена.

Расчеты показывают сильное влияние угла раскрытия канала на характеристики турбулентного течения. Увеличение интенсивности турбулентности при подводе тепла к стенке приводит к увеличению характеристик теплообмена.

С помощью численного моделирования определены характеристики экспериментальной установки противоточного теплообменника с диффузорными каналами. В зависимости от положения вентиляльных переключателей теплообменник может работать в двух режимах: диффузор в диффузоре (расширяющиеся каналы) или конфузор в конфузоре (сходящиеся каналы).

Расчеты проведены с использованием трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности [1], дополненной уравнениями турбулентного теплообмена, и проведено численное исследование течения и теплообмена в кольцевом и коническом каналах с разной степенью расширения. В качестве теплоносителя рассматривалась вода.

Показано, что в расширяющихся каналах (кольцевых и конических) при всех рассмотренных углах раскрытия основные характеристики теплообмена - число Нуссельта и коэффициент аналогии Рейнольдса - оказываются выше, чем в сужающихся каналах, при одном и том же числе Рейнольдса.

Для этих двух режимов работы теплообменника были измерены характеристики теплопередачи и сопоставлены с расчетными данными.

Интенсификация теплообмена в таком теплообменнике с диффузорными каналами достигается без заметного увеличения коэффициента трения. В этом принципиальное отличие рассматриваемого способа интенсификации теплоотдачи от многих известных способов, где увеличение теплоотдачи достигается за счет значительного увеличения гидравлических потерь.

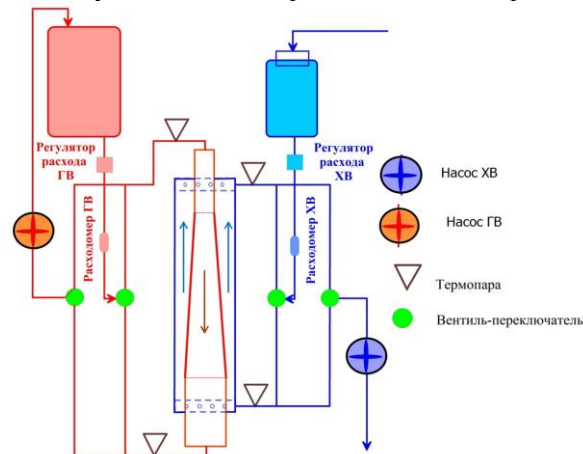


Схема экспериментальной установки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №. 20-19-00404.

1. Lushchik V. G., Pavel'ev A. A., Yakubenko A. E. "Three-parameter model of shear turbulence: heat transfer calculations," Fluid Dyn 21, 200–211, 1986.

МНОЖЕСТВО ДОСТИЖИМОСТИ МАШИНЫ ДУБИНСА С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ НА УПРАВЛЕНИЕ

Трубников Г.И., Пацко В.С., Федотов А.А.

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: jora_it@mail.ru

Математическая “машина Дубинса” — объект, передвигающийся на плоскости x, y с постоянной скоростью. Управлением $u(t)$ является угловая скорость (производная по времени от функции $\varphi(t)$). Интеграл от квадрата управления на оговоренном промежутке $[0; t_f]$ не должен превышать числа $\mu > 0$. Каждой функции $u(\cdot)$ соответствует движение $x(\cdot), y(\cdot)$, и оно задает форму тонкого нерастяжимого стержня, закреплённого под определёнными углами на своих концах. Число μ ограничивает упругую энергию стержня [1, 2]. Полагаем $x_0 = y_0 = \varphi_0 = 0$. Множество достижимости $G(t_f)$ при $t_f > t_0 = 0$ определяем как совокупность всех точек $(x, y, \varphi)^T$, в каждую из которых в момент t_f приводит некоторое допустимое управление. Цель работы — исследование трехмерного множества достижимости $G(t_f)$.

Любое ненулевое управление, ведущее на границу множества $G(t_f)$, доставляет равное μ минимальное значение функционала $\int u(t)^2 dt$ при фиксированных краевых условиях. Соответствующие экстремальные движения называются эластиками Эйлера.

Исследуя множество $G(t_f)$, опираемся на опыт [3] построения множества достижимости для случая геометрических ограничений $|u(t)| \leq \mu$. Существенные трудности связаны с необходимостью использования эллиптических функций.

На рис. 1 слева показано трехмерное множество $G(t_f)$, просчитанное для $\mu = 100, t_f = 0.95$. Цветом выделены участки границы, на которые ведут различные типы управлений: U_1 — положительное управление (синий цвет), U_4 — отрицательное управление (желтый цвет), U_3 — управление с одним моментом смены знака с “+” на “–” (зеленый цвет), U_2 — управление с одним моментом смены знака с “–” на “+” (фиолетовый цвет). Точка $z^0(t_f)$, в которую ведет нулевое управление, лежит на стыке четырех указанных участков. Множество $G(t_f)$ не является односвязным: имеется полость, ему не принадлежащая. Чтобы показать ее, на рис. 1 справа представлено сечение множества $G(t_f)$ при $\varphi = 0$. От оси x отходят симметричные друг другу кривые A_3 и A_2 . Их дуги до точки P_1 первого пересечения дают “внешнюю” границу сечения. Дуги A_3 и A_2 от точки P_1 до точки P_2 второго пересечения лежат во внутренности сечения. Кривая A_6 и примыкающие к ней участки кривых A_3 и A_2 после точки P_2 составляют границу “дырки”, не принадлежащей сечению. Пунктиром показаны траектории четырех движений, ведущих на границу сечения (а стало быть, и на границу трехмерного множества $G(t_f)$). Такие кривые представляют собой глобально оптимальные эластики Эйлера.

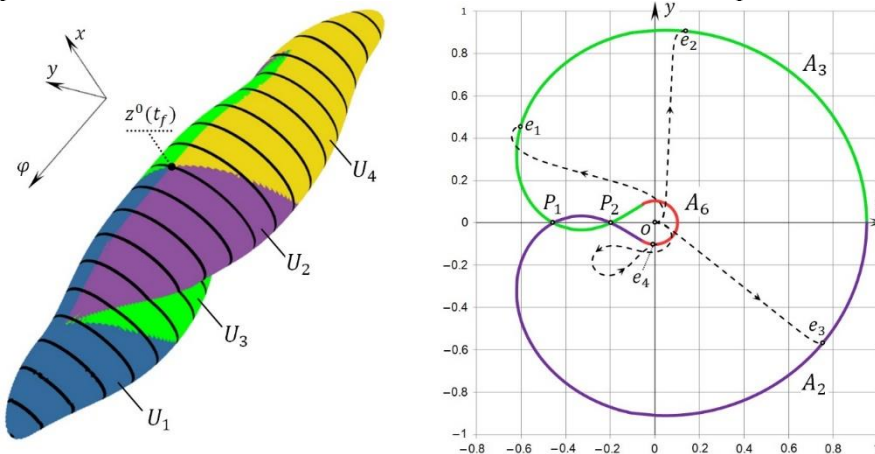


Рис. 1. Трехмерное множество достижимости $G(t_f)$ для $\mu = 100, t_f = 0.95$ и его сечение при $\varphi = 0$.

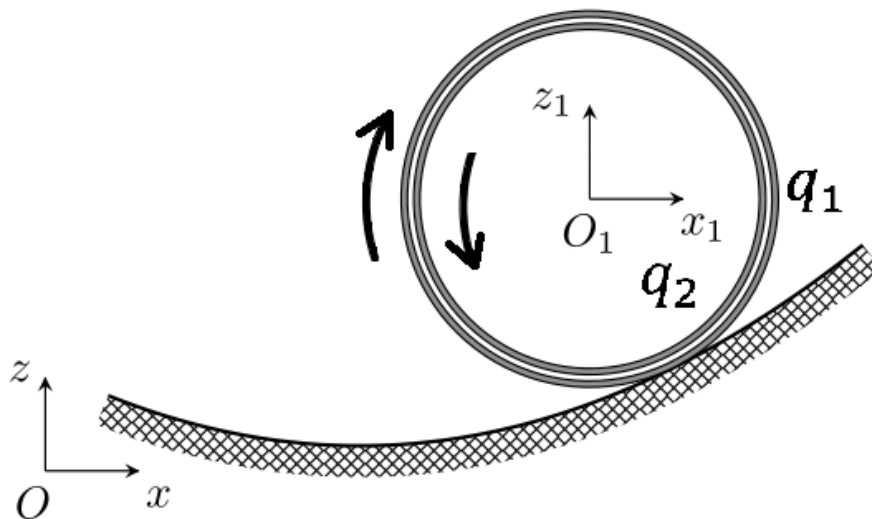
1. Зеликин М. И. Теория и приложения задачи об эйлеровых эластиках // УМН, 2012, Т. 67, вып. 2, С. 93–108.
2. Ардентов А. А., Сачков Ю. Л. Решение задачи Эйлера об эластиках // АиТ, 2009, вып. 4, С. 78–88.
3. Пацко В. С., Пятко С. Г., Федотов А.А. Трехмерное множество достижимости нелинейной управляемой системы // Изв. РАН. ТиСУ. 2003. № 3. С. 8–16.

УПРАВЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИМ РОБОТОМ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

Тузиков А.М.

Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
e-mail: alex.tuzikov21@gmail.com

В последнее десятилетие внимание ученых приковано к мобильным роботам, в том числе и сферическим, которые применяются в различных областях человеческой деятельности. В общем случае сферический робот представляет собой сферическую оболочку с движущимися внутри нее материальными телами. В качестве движителей могут быть использованы различные технические конструкции такие, как система вращающихся маховиков, набор перемещающихся масс, расположенных на взаимно перпендикулярных осях, а также маятник, связанный при помощи шарнира со сферической оболочкой и приводимый в движение системой моторов [1]. Сферические роботы относятся к классу систем с внутренними перемещающимися массами и обладают рядом отличительных свойств, характерных для таких систем. Во-первых, движение сферического робота осуществляется за счет сил трения, приложенных к сферической оболочке в точке контакта с поверхностью, по которой он движется. Во-вторых, сферическая форма надежно защищает внутренности робота от внешних воздействий и загрязнения. В-третьих, сферический робот, постоянно переворачиваясь, остается между тем в рабочем состоянии. В-четвертых, как показывают проведенные исследования, поведение таких роботов описывается достаточно сложными математическими моделями, но все же позволяющими исследовать их динамику и разрабатывать стратегии управления ими.



Схематичное изображение сферического робота с электромагнитным приводом.

В моей работе модель сферического робота представляет собой две сферы, внутреннюю и внешнюю, на которых, по заданному принципу, распределены электрические заряды. Движение этих двух сфер осуществляется за счет электрического взаимодействия находящихся на разных сферах зарядов. Основной целью данной работы является построение управления сферическим роботом и анализ его поведения. Также формулируется принцип распределения зарядов на сферах.

Работа выполнена в рамках Программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего», проект #075-02-2023-945.

1. Баландин Д.В., Комаров М.А., Осипов Г.В. Управление движением сферического робота с маятниковым приводом // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. №4. С. 150.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН В ГАЗЕ

Формалин А.В.¹, Звягин А.В.¹, Веденеев В.В.^{1,2}, Колотников М.Е.²

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

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

e-mail: avformalin@mail.ru

Важнейшим элементом конструкции лопаточных машин (турбины, компрессоры, насосы и т.д.) являются лопатки, закреплённые на вращающемся диске. Лопатка вращается вместе с валом и взаимодействует с движущимся газом. При этом возможно возникновение развитых колебаний лопатки, вызванных резонансами с возбуждающими гармониками от аэродинамических следов впереди стоящих преград или окружной неоднородности потока.

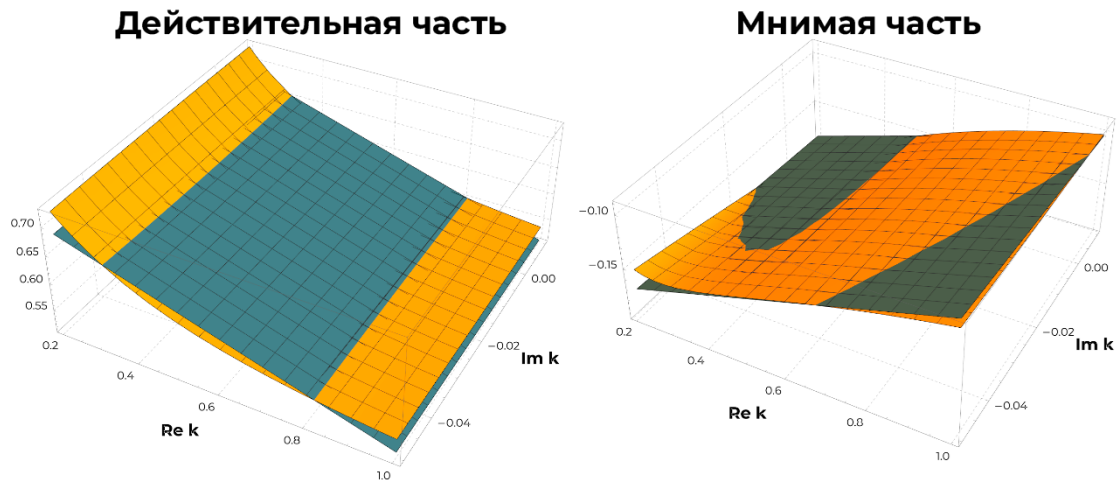
Колебания лопаток в реальных условиях протекают, когда на них действуют силы сопротивления колебаниям, что приводит к уменьшению амплитуды резонансных колебаний лопаток, т.е. демпфированию их колебаний.

Рассмотрено колебание лопатки по первой изгибной форме при наличии двух механизмов демпфирования колебаний: потери энергии в материале гистерезисного типа и рассеяние энергии за счёт взаимодействия с потоком газа.

Цель данной работы – установить относительное влияние на величину декремента колебаний двух источников потерь энергии, выявить наиболее существенный механизм.

Для анализа колебаний применяется стержневая модель лопатки. Рассеяние энергии внутри материала оценивается моделью Фойгта. Для описания аэродинамической составляющей рассеяния энергии колебаний используется решение Теодорсена для колебаний тонкого профиля в потоке газа.

За счёт выбора диапазона чисел Струхала, аппроксимации функции Теодорсена и упрощения выражений на основании оценки порядков величин удалось получить аналитическое решение аэроупругой задачи и определить вклад в полный декремент колебаний от аэродемпфирования и от внутреннего трения в материале.



Линейное приближение функции Теодорсена.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Франц Е.А.¹, Крылов А.А.², Шелистов В.С.¹, Демехин Е.А.^{1,3}

¹Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

²Кубанский государственный университет, Краснодар

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

e-mail: eafrants@fa.ru

В течение 20-го века основное внимание в исследовании электрофореза диэлектрических частиц уделялось линейному электрофорезу. Однако в последние десятилетия наблюдается прогресс в изучении нелинейных электрокинетических эффектов, включая нелинейный электрофорез [1]. Это связано, прежде всего, с разнообразием областей применения электрофореза, таких как микрофлюидика, коллоидная химия и секвенирование ДНК. Недавние исследования показали, что электрофорез в микрожидкостных чипах может быть использован для быстрого и эффективного обнаружения бактерий [2]. Как теоретические, так и экспериментальные исследования выявили более высокую скорость электрофореза в трех случаях: высокая напряженность электрического поля E , высокая плотность поверхностного заряда σ и наличие гидрофобных свойств поверхности.

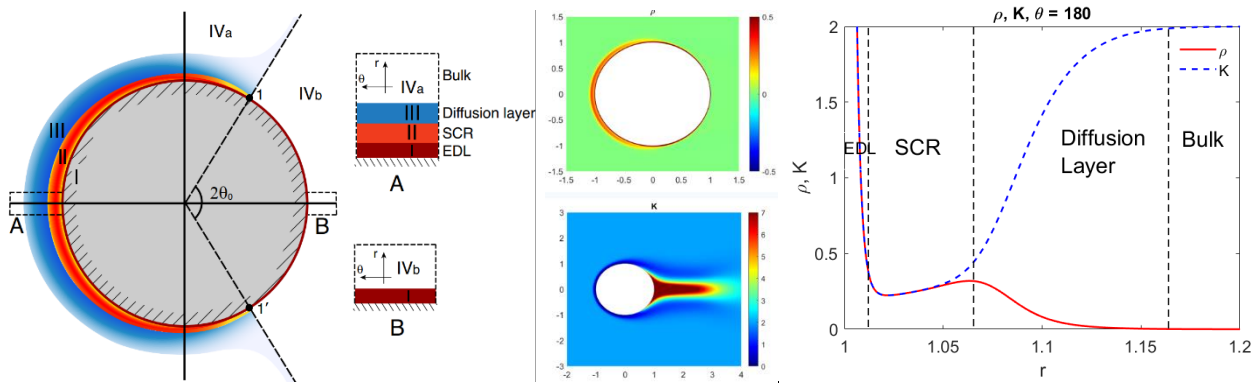


Рис. 1. Слева направо: 1) схематичное изображение структуры тонких пограничных слоев около поверхности частицы в сильном электрическом поле; 2) распределения плотности заряда ρ и суммарной концентрации ионов K около поверхности частицы ($E = 55$, $\nu = 0.0086$, $\kappa = 0.26$, $\delta = 2$, $\sigma = -60$) и 3) сечения ρ и K для угла 180 градусов (передний фронт частицы).

Распределение плотности заряда ρ показывает несимметричную картину с формированием зоны пространственного заряда в области набегающего потока. На распределении суммарной концентрации ионов K видно формирование области обессоливания в области набегающего потока жидкости и формировании структуры повышенной концентрации с противоположной стороны частицы. Если посмотреть сечения для угла 180 градусов, что соответствует переднему фронту частицы, увидим наличие характерного максимума заряда, что соответствует области пространственного заряда и наличие области пониженной концентрации, которая падает примерно до $K = 0,3$ при равновесном значении в растворе $K = 2$. Если наложить распределения K и ρ на один график, можно четко выделить структуру пограничных слоев в области набегающего потока. Сначала идет двойной электрический слой с резким падением обеих функций, затем область пространственного заряда, где функции стабилизируются и лишь незначительно изменяются и затем диффузионный слой, в котором функции выходят на свои равновесные значения в объеме электролита. Ранее было показано, что аналогичная структура тонких пограничных слоев формируется около поверхности ионообменной частицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-00082).

1. A.S. Khair. Nonlinear electrophoresis of colloidal particles // Current Opinion in Colloid & Interface Science 59, 101587 (2022).

2. Z. Quan, Y. Chen, X. Zhao, S. Yu, Y. Li, Y. Xu, J. Xu, H. Chen, L. Geng, Y. Deng. Development of high-resolution multidimensional native protein microfluidic chip electrophoresis fingerprinting and its application in the quick analysis of unknown microorganisms. Journal of Chromatography A 1665, 462,797 (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОРОТАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ГАЛАКТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Хасаева Т.Т.^{1,2}

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

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва
e-mail: justanyan@yandex.ru

На данный момент известно, что в ряде спиральных галактик, таких как Млечный путь, присутствует магнитное поле порядка 1 мкГс [1]. Эволюция такого поля описывается механизмом динамо, связанным с турбулентными движениями в межзвездной среде, а также крупномасштабным движением слоев галактического вещества относительно друг друга. В некоторых галактиках присутствуют смены направления силовых линий магнитного поля в радиальном направлении, то есть, инверсии. Недавние вычислительные исследования наглядно показали, что во внешних областях галактического диска могут присутствовать магнитные поля [2], а также инверсии [3].

Одним из возможных механизмов, объясняющим формирование таких полей, является магниторотационная неустойчивость. В [4] был рассмотрен вопрос о возбуждении магнитных полей в аккреционных дисках. По всей видимости, данное явление также может оказывать влияние на галактические объекты. В настоящей работе приведены результаты численного исследования вклада магниторотационной неустойчивости в формирование магнитных полей на расстояниях 15-20 кпк от центра галактики.

На рисунке 1 показана старшая собственная функция, соответствующая разным значениям безразмерного параметра, характеризующего плотность среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-17-00114 «Вычислительные задачи геофизической магнитогидродинамики».

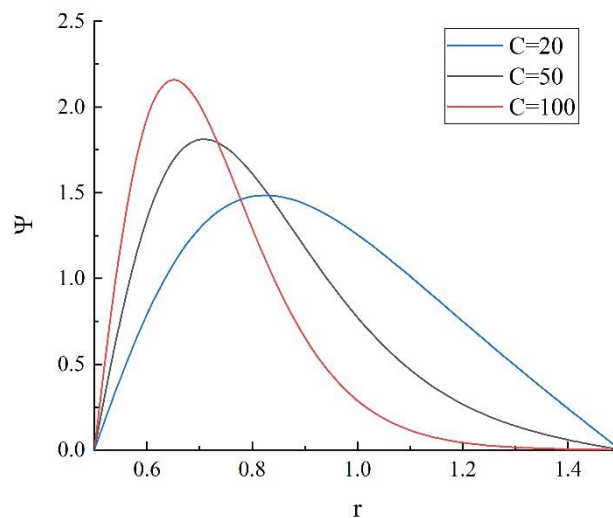


Рис. 1: Старшая собственная функция, соответствующая параметрам $C=20$, $C=50$ и $C=100$, соответственно.

1. Beck R., Brandenburg A., Moss D. et al. Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. V. 34. P. 155-206.
2. Mikhailov, E., Kasparova, A., Moss, D. et al. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs // Astronomy and Astrophysics. 2014. V. 568. P.66-77.
3. Михайлов Е.А., Хасаева Т.Т., Тепляков И.О. Возникновение контрастных структур для галактического магнитного поля: теоретические оценки и моделирование на видеокартах// Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33. С. 253-264.
4. Shakura, N., Postnov, K., Kolesnikov, D., Lipunova, G., On the appearance of non-local MRI in Keplerian accretion discs // Preprint arXiv:2210.15337v1 [astro-ph.HE].2022.

РЕЖИМЫ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПЛАСТА В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Чернова А.А.

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: anya_chernova_2504@mail.ru

Рассмотрена задача двухфазной фильтрации несжимаемых жидкостей в анизотропной пористой среде, находящейся в поле силы тяжести. Определены критерии подобия, характеризующие направления течения вытесняющей и вытесняемой жидкостей. В рамках исследования численных решений профильной задачи фильтрации проведена классификация режимов вытеснения из анизотропного пласта [1]. Показано, что существует четыре режима, соответствующих качественно различным течениям (Рис.). Проведено сравнение их эффективности в терминах коэффициента извлечения жидкости из пласта и коэффициента его охвата вытеснением. Исследовано влияние капиллярного давления на эффективность вытеснения в различных режимах течения. Показано, что в одних случаях увеличение влияния капиллярного давления приводит к повышению коэффициента вытеснения, а в других режимах, наоборот, – к его снижению. Исследовано влияние положений источника и стока на эффективность вытеснения в различных режимах течения.

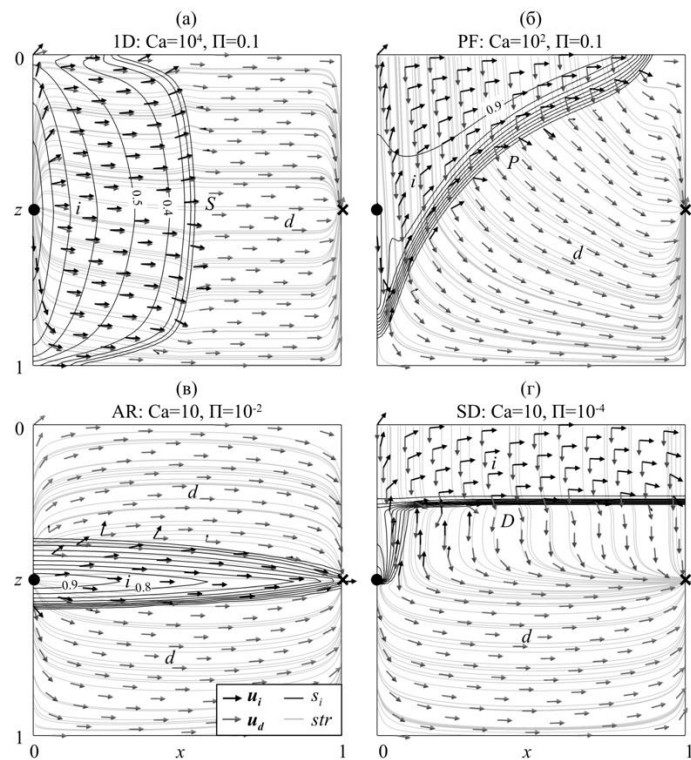


Рис. Линии уровня вытесняющей жидкости $s_i = \text{const}$, мгновенные линии тока вытесняемой жидкости d (str) и направления скоростей u_i и u_d в режимах вытеснения 1D, PF, AR и SD при $t = 0.25$ (а–г, соответственно). Линии уровня s_i приводятся с шагом 0.1.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-71-10051, <https://rscf.ru/project/19-71-10051/>.

1. Чернова А.А., Афанасьев А.А. Режимы вытеснения жидкости из анизотропного пласта в поле силы тяжести // МЖГ. Изв. РАН. 2023. №5. В печати.

БЕССЕТОЧНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ УПРУГОЙ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЁТА

Чичерина А.Д.^{1,2}, Веденеев В.В.^{1,2}

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

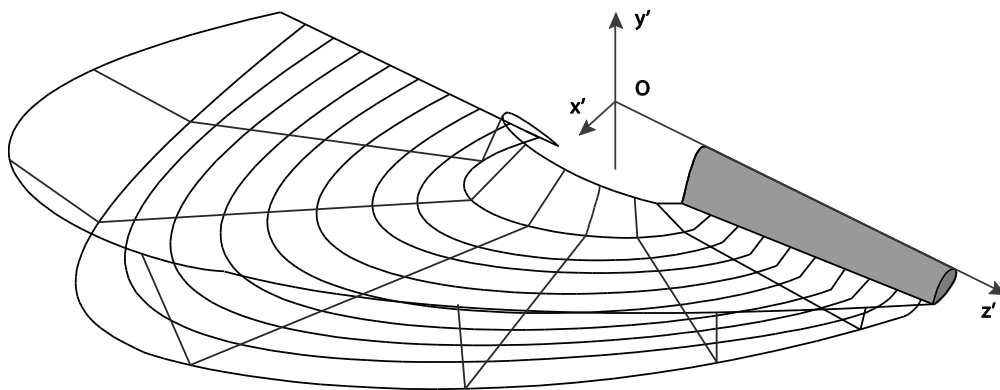
²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: chicherina@imec.msu.ru

В работе представлено бессеточное численное моделирование трехмерного нестационарного безотрывного обтекания упругой лопасти винта вертолета идеальной несжимаемой жидкостью. Для нахождения аэродинамических сил и моментов, действующих на тело, используется метод дискретных вихрей [1]. Воздействие тела на поток в каждый момент времени моделируется вихревым слоем, расположенным на поверхности тела, и вихревой пелены за ним. Для определения изменения формы лопасти под действием рассчитанных на данном временном шаге нагрузок используется балочная модель. Уравнение движения балки учитывает изгиб и кручение [2]. На следующем шаге в расчете, учитывая изменения в геометрии тела, используется новая вихревая схема для нового положения лопасти, вычисляются нагрузки, и далее итерации повторяются.

Реализованный программный код для численного решения задачи о нестационарном обтекании трехмерных тел идеальной несжимаемой жидкостью оттестирован на сходимость по пространственной сетке и временному шагу. Проведена его верификация на модельных задачах, результаты расчетов находятся в согласии с результатами других авторов.

Численный метод не содержит произвольных эмпирических параметров. Разработанный метод решения связанной аэроупругой задачи позволяет рассчитать маховое движение лопасти при горизонтальном полете и исследовать границу флаттера.



Вихревой след за вращающейся лопастью винта вертолета.

1. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука. 1978.

2. Окопный Ю.А., Радин В.П. Механика материалов и конструкций. М.: Машиностроение. 2001.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ НАНОЩЕЛИ

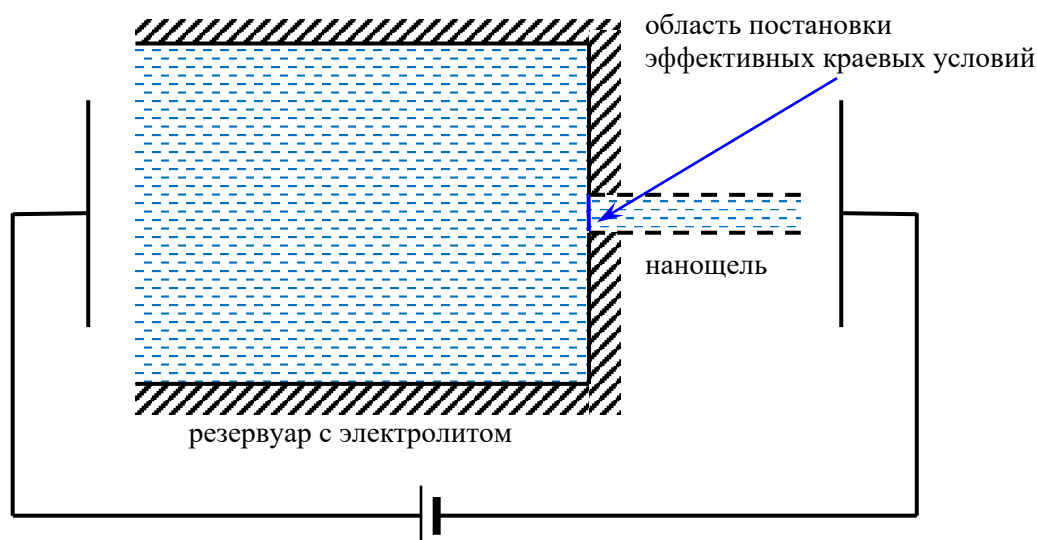
Шелистов В.С.¹, Алексеев М.С., Пономарёв Р.Р., Попов В.А., Демёхин Е.А.^{1,2}

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва

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

e-mail: VSShelistov@fa.ru

Нанощели – каналы толщиной порядка 10^{-9} – 10^{-7} м – активно применяются в микрофлюидных устройствах. Электрическое поле, создаваемое поверхностным зарядом стенок, распространяется на всю толщину нанощели, за счёт чего она приобретает ионоселективные свойства. По сравнению с традиционными ионоселективными мембранами, система щелей со специально подобранной геометрией может обеспечить заданные характеристики устройства сразу, без дополнительного процесса обработки. Нанощели используются для создания нанофлюидных диодов/транзисторов, сепараторов и детекторов заряженных молекул [1]. Особенно интересные результаты были достигнуты в биотехнологии: так, к примеру, удачно подобранная геометрия устройства может локально повышать концентрацию аналита на 6 порядков [2]. При этом, если динамика системы с однородной ионоселективной поверхностью уже поддаётся прямому численному моделированию [3], то рассмотрение отдельных нанощелей пока ведётся на уровне упрощённых моделей [4].



Геометрия модели: резервуар с диэлектрическими стенками, из которой выходит нанощель.

В представляемом докладе рассматривается численная модель поведения электролита около заряженной диэлектрической непроницаемой стенки, содержащей одиночную нанощель. Динамика электролита внутри щели задаётся аналитически в виде эффективных краевых условий, а в расчётной области – как решение системы уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса без дополнительных упрощений. Указываются возможные способы обобщения алгоритма численного моделирования для учёта реального поведения электролита в нанощели.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00307).

1. Han W., Chen X. A review: applications of ion transport in micro-nanofluidic systems based on ion concentration polarization // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2020. Vol. 95, N 6. Pp. 1622-1631.

2. Wang Y.-C., Stevens A.L., Han J. Million-fold preconcentration of proteins and peptides by nanofluidic filter // Analytical Chemistry. 2005. Vol. 77, N. 14. Pp. 4293-4299.

3. Demekhin E.A., Nikitin N.V., Shelistov V.S. Three-dimensional coherent structures of electrokinetic instability // Physical Review E. 2014. Vol. 90, N 1. 013031.

4. Ouyang W., Ye X., Li Z., Han J. Deciphering ion concentration polarization-based electrokinetic molecular concentration at the micro-nanofluidic interface: theoretical limits and scaling laws // Nanoscale. 2018. Vol. 10. Pp. 15187-15194.

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПАДЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ

Шорохов В.В., Виленский О.Ю., Лапшин Д.А.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: lapshin@okbm.nnov.ru

Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышенными требованиями безопасности, предъявляемыми к объектам использования атомной энергии (ОИАЭ). Особое место на данных объектах занимают системы хранения и транспортирования ядерного топлива вследствие существования потенциальной возможности возникновения ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологических операций (ТТО), что может привести к серьёзным радиационным последствиям.

Задача проектирования сводится к оценке степени повреждения и разгерметизации оборудования. Для выполнения подобного анализа применяют специализированные программные продукты (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, ЛОГОС и т.д.), позволяющие решать уравнения механики сплошной среды для определения напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкций в условиях интенсивного динамического нагружения. Степень достоверности результатов численного моделирования процесса деформирования в процессе соударения во многом определяется качеством конечно-элементных моделей конструкции и качеством математических моделей поведения конструкционных материалов, адекватно описывающих влияние условий нагружения на диаграммы деформирования. Поскольку указанный процесс является динамическим, определяющие соотношения должны учитывать влияние скорости деформации на радиус поверхности текучести. Кроме того, локальные интенсивные пластические деформации в условиях ударного нагружения приводят к существенному адиабатическому разогреву и разупрочнению материала. В связи с этим при моделировании деформирования материала необходимо также учитывать влияние температуры на механические характеристики.

Целью настоящей работы являлась оценка напряженно-деформированного состояния тепло выделяющей сборки (ТВС) при ее возможном падении в случае обрыва крепежных или строповых элементов при выполнении транспортно-технологических операций. На рисунке представлен график изменения ускорений в центральной части ТВС при соударении. Описанная методика позволяет решать задачи, связанные с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций объектов использования атомной энергии, избежать дорогостоящих натурных испытаний, что способствует повышению конкурентоспособности изделий за счет снижения себестоимости. Полномасштабное математическое 3D - моделирование позволило выполнить детальный анализ динамических процессов, сократив сроки проектирования, и снизить себестоимость разрабатываемой конструкции. Полученные результаты, позволили проанализировать процесс соударения, определить пластические деформации, возникающие в элементах ТВС и дать рекомендации по усилению конструкции.

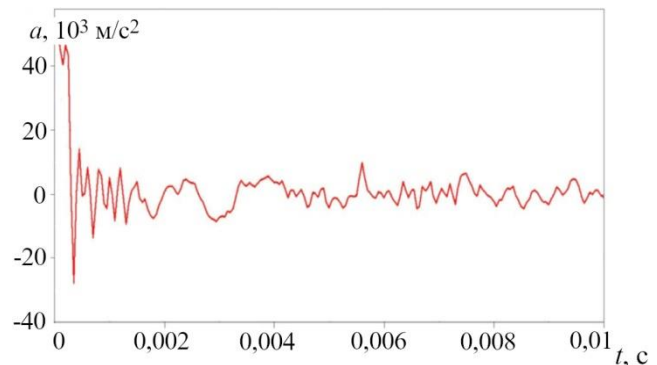


График изменения ускорений
в центральной части ТВС при соударении.

1. Виленский О.Ю., Лапшин Д.А., Новинский Э.Г., Рябцов А.В., Шорохов В.В. Расчетный анализ и оценка последствий падения ТВС с применением верифицированных моделей деформирования конструкционных материалов// Атомная энергия, Москва. Т.131. вып. 5 2021 г. С. 295–298.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ УЧАСТКА ЛОКАЛЬНОЙ АБСОЛЮТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

Экстер Н.М.¹, Гареев Л.Р.², Зайко Ю.С.²

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

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

e-mail: ekster2000@inbox.ru

Известно, что затопленные струи с классическими профилями скорости и плотностью, не отличающейся от плотности окружающей среды, могут быть абсолютно неустойчивыми лишь при наличии противотечения на границе [1]. Для изотермических струй, плотность которых равна плотности окружающей среды, со сложными «неклассическими» профилями было обнаружено, что возможна абсолютная неустойчивость без наличия противотечения (например, [2]). В [3] было показано, что наличие достаточно протяжённого вдоль оси течения вниз по потоку участка локальной абсолютной неустойчивости приводит к глобальной неустойчивости течения. Ожидается, что получение струи с достаточно длинным участком локальной абсолютной неустойчивости позволит создать абсолютно неустойчивую струю без противотечения экспериментально.

В настоящей работе определяется длина участка локальной абсолютной неустойчивости затопленной струи с целью управления рассматриваемым течением и поиска геометрии устройства, его формирующего. При этом начальный профиль скорости струи задается двумя параметрами ξ , ζ , как это сделано в [4]. Параметр ξ отвечает за положение точки перегиба на профиле скорости, ζ — за ширину формирующего струю устройства. Разработана программа на языке Python, определяющая длину участка локальной абсолютной неустойчивости (в невязком приближении) путём поиска седловых точек на плоскости $(\text{Re}\alpha, \text{Im}\alpha)$, где α — волновое число, для струи при числе Рейнольдса 9000 и при различных значениях параметров ξ , ζ . Расчеты течения при фиксированных ξ , ζ проведены в пакете Ansys CFX. Проанализировано 600 пар значений параметров ξ , ζ и определены длины участков локальной абсолютной неустойчивости соответствующих струй (рис. 1). На следующем этапе работы будет найдена геометрия формирующего устройства, обеспечивающая начальный профиль скорости, для которого длина участка локальной абсолютной неустойчивости максимальна среди исследованных профилей.

Исследование Н.М. Экстера (построение графика зависимости длины участка локальной абсолютной неустойчивости от параметров, задающих начальный профиль скорости) выполнено за счёт гранта РНФ 20-19-00404-П. Исследование Ю.С. Зайко (определение абсолютной или конвективной неустойчивости по кривым $\alpha(\omega)$) выполнено за счёт гранта МК-4090.2022.4. Исследования выполнены в НИИ механики МГУ им. Ломоносова.

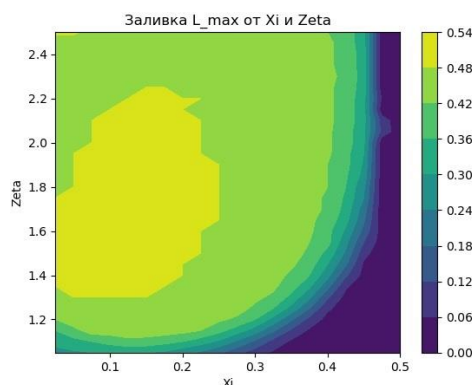


Рис. 1. Заливка плоскости параметров ξ , ζ , отвечающих за форму начального профиля скорости струи, длиной участка ее локальной абсолютной неустойчивости.

1. Abid, M., Brachet, M., Huerre, P. Linear hydrodynamic instability of circular jets with thin shear layers // Eur. J. Mech. B/Fluids. 1993. V. 12(5). P. 683 – 693.
2. Vedeneev V.V., Zayko J.S. On absolute stability of free jets // J. Phys: Conf. Series. 2018. V. 1129. 012037.
3. Le Dizes S., Huerre P., Chomaz J.M., Monkewitz P.A. Linear global modes in spatially developing media // Philos. Trans. R. Soc. London A. 1996. V. 354, № 1705. P. 169–212.
4. V. Vedeneev, N. Nikitin. Absolute instability of plane incompressible jets// J. Fluid Mech. 2023. V. 962.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ШТАМПА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Яковенко А.А.¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
e-mail: anastasiya.yakovenko@phystech.edu

При контакте тел с поверхностной шероховатостью процессы взаимодействия протекают не по всей номинальной области контакта, а лишь по отдельным пятнам. Как следствие, реальная площадь контакта составляет лишь часть номинальной, а также возникают концентрации контактных и внутренних напряжений. Это в свою очередь влияет на многие практически важные процессы, например, трение и износ деталей.

В настоящее время для решения задач контакта тел с учетом поверхностной шероховатости используются различные численные методы, так как аналитические подходы применимы лишь для ограниченного круга задач, например, периодических. Предположив, что поверхностный микрорельеф тел представляет собой некоторую регулярную структуру, мы можем получить некоторые выражения, позволяющие исследовать влияние параметров микрогеометрии тел на характеристики контактного взаимодействия.

В данной работе исследован контакт с упругим полупространством периодической системы одинаковых осесимметричных штампов двух высотных уровней. Контактующая поверхность штампов описывается степенной функцией радиуса, а плотность их расположения определяется шагом периодической решетки. Использование для решения задачи метода локализации [1] позволяет не только определить контактные характеристики, как это сделано в [2] для сферических штампов, но и распределение внутренних напряжений. При этом исследуется влияние формы штампов и их пространственного расположения на распределение контактных давлений по поверхности и компонент тензора напряжений по глубине. Так, на рис.1 представлены зависимости максимальных касательных напряжений $\tau_{\max}$ от вертикальной координаты z на оси, проходящей через центры штампов первого (1) и второго (2) высотных уровней. Полученные результаты также сравниваются с теорией, не учитывающей взаимное влияние штампов.

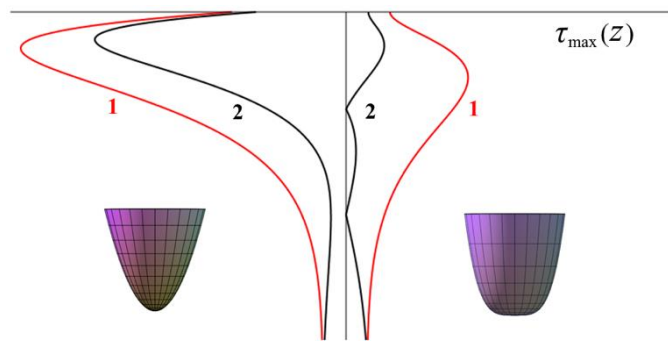


Рис.1 Распределение максимальных касательных напряжений $\tau_{\max}$ по глубине z вдоль осей симметрии штампов обоих уровней (две формы).

Из анализа результатов следует, что наличие на поверхности тел шероховатости приводит к явному неравномерному распределению напряжений по глубине вблизи поверхности контакта. При этом могут возникать пластические деформации и локальные разрушения. Расположение и величина концентраций напряжений зависит как от формы неровностей, так и от плотности их расположения на поверхности тела. Следовательно, изменяя параметры поверхностной микрогеометрии тел, можно контролировать процессы износа и разрушения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-49-02010.

1. Горячева И.Г. Периодическая контактная задача для упругого полупространства // ПММ. 1998. Т. 62. № 6. С. 1036-1044.
2. Yakovenko A., Goryacheva I. The discrete contact problem for a two-level system of indenters // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2022.

Научное издание

***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ-МЕХАНИКОВ***

4 – 14 сентября, 2023 г.; Сочи, "Буревестник" МГУ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Электронное издание сетевого распространения

Публикуется в авторской редакции

Макет утвержден 30.08.2023

Формат 60x84 1/8
Усл. печ. л.

Издание № 12519

Издательство Московского университета

119191, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

(ул. Академика Хохлова, д. 11)

<http://youngmech.ru/images/conference/files/Thesis2023.pdf>