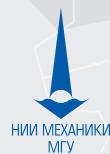




НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова
Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ–МЕХАНИКОВ

4–14 сентября 2022 СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ

***4–14 СЕНТЯБРЯ 2022
СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ***

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 531/534

ББК 22.2

В 84

Ответственные редакторы:

А.А. Афанасьев, М.С. Макарова

Составители: О.О. Иванов, А.М. Чайка

В84 Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2022. Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2022 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2022. – 174 с. – (Электронное издание сетевого распространения).

ISBN 978-5-19-011787-5 (e-book)

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

Конференция проводится при финансовой поддержке НЦМУ "Сверхзвук".

УДК 531/534

ББК 22.2

ISBN 978-5-19-011787-5 (e-book)

© Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова, 2022

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

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

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ

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

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

Члены Научного комитета

А.В. Горобец (ИПМ РАН, Москва); И.А. Знаменская (МГУ, Москва); С.А. Калинин (ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ», Санкт-Петербург); А.М. Кривцов (СПбПУ, Санкт-Петербург); Т.П. Любимова (ИМСС УрО РАН, Пермь); Н.И. Макаренко (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск); Н.В. Никитин (МГУ, Москва); М.Ю. Овчинников (ИПМ РАН, Москва); А.Г. Петров (ИПмех РАН, Москва); Н.Н. Смирнов (МГУ, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Горобец А.В., Дубень А.П.</i>	15
ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ НА ГИБРИДНЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ	
<i>Горячева И.Г.</i>	16
МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОСМАЗЫВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	
<i>Знаменская И.А.</i>	17
МЕТОДЫ ПАНОРАМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТИ ГАЗА И ПЛАЗМЫ	
<i>Калинин С.А.</i>	18
МЕХАНИКА В РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
<i>Кривцов А.М.</i>	19
ДИНАМИКА МАССЫ И ЭНЕРГИИ	
<i>Любимова Т.П.</i>	20
КОНВЕКЦИЯ В НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЯХ	
<i>Макаренко Н.И.</i>	21
ГИДРОДИНАМИКА ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ	
<i>Никитин Н.В.</i>	22
МЕХАНИЗМ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ СНЖЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ	
<i>Овчинников М.Ю.</i>	23
МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ И ДАЛЬНЕГО КОСМОСА. ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ И УПРАВЛЕНИЯ	
<i>Петров А.Г.</i>	25
О СВЕРХСХОДЯЩИХСЯ ЧИСЛЕННЫХ СХЕМАХ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
<i>Смирнов Н.Н., Тюренкова В.В., Никитин В.Ф.</i>	26
ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ	
<i>Абдурахимов Ф.А., Веденеев В.В., Жидяев К.А.</i>	28
АЭРОУПРУГИЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ВЕРТОЛЕТА	
<i>Абдульманов К.Э., Никитин Н.В.</i>	29
РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В КРУГЛОЙ СТРУЕ С ДВУМЯ МОДАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ	
<i>Афанасьев А.А., Веденеева Е.А., Гречко С.С.</i>	30
ЗАКОН ПОДОБИЯ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ЗАКАЧКЕ CO₂ В НАКЛОННЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ	
<i>Агеев А.И., Вигдорович И.И., Манаенкова Т.А.</i>	31
СВЯЗЬ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ И ТЕМПЕРАТУРОЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	
<i>Акифьев К.Н., Большаков П.В., Семенова Е.В., Харин Н.В., Стаценко Е.О., Саченков О.А.</i>	32
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ НЕОДНОРОДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ	

<i>Акинъшин Р.В., Зайцев М.Ю., Титарев В.А., Фараносов Г.А.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНАЛЬНОГО ШУМА НЕСУЩЕГО ВИНТА С ПОМОЩЬЮ КОДА “ГЕРБЕРА”	33
<i>Алексеев М.С., Ганченко Г.С., Мороз И.А., Мареев С.А.</i> ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРКОНЦЕНТРАЦИИ ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛЫ	34
<i>Алпатов И.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ УПРУГОЙ ФЕРМОЙ	35
<i>Амелюшкин И.А., Дружинин О.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, РЕЖИМЫ И МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПО ВОДЕ КОЛЕСА С ГРУНТОЗАЦЕПАМИ	36
<i>Амелюшкин И.А., Кудров М.А., Морозов А.О.</i> МОДЕЛИ САЛЬТАЦИИ СНЕГА, ДИНАМИКИ КРИСТАЛЛОВ И ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ КАПЕЛЬ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ	37
<i>Кравченко М.Н., Аминев Д.А.</i> МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА	38
<i>Андреева А.И., Афанасьев А.А.</i> ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НЕФТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ	39
<i>Сметанников О.Ю., Анисимов А.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИКИ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА БИОСОВМЕСТИМЫХ ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПУГОВОГО ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА РЕЕК (ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОН)	40
<i>Апкадилова Н.Г., Крылова К.А.</i> ПРОЦЕСС НАВОДОРАЖИВАНИЯ СКОМКАННОГО ГРАФЕНА РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ	41
<i>Белоусова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ ТИТАНА	42
<i>Бесчеров Д.Е., Ереев М.Н., Куликов Д.А., Маслов М.Г., Порфирьев М.С., Савчук Д.В.</i> УЛУЧШЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ РУ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ	43
<i>Бикбаев Р.М., Palani I.A., Реснина Н.Н., Беляев С.П., Mani Prabu S. S., Manikandan M., Jayachandran S., Anshu Sahu</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА TiNi, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ	44
<i>Большаков П.В., Харин Н.В., Акифьев К.Н., Саченков О.А.</i> СТРУКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	45
<i>Бритов А.Д., Ярикова С.П., Елистратов С.А., Епихин А.С., Сибгатуллин И.Н.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГРЕБНОГО ВИНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТОВ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ	46
<i>Буковский П.О., Муравьева Т.И., Щербакова О.О., Шкалей И.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	47

<i>Варьян И.А., Колесникова Н.Н., Попов А.А.</i> БИОДЕГРАДАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРИРОДНОЙ ДОБАВКИ	48
<i>Вершинина Ю.В., Прохоров С.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ	49
<i>Ветлицын М.Ю., Шаронов Н.Г.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ФИКСАЦИИ ЗАДАННОЙ ПОЗИЦИИ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ И РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ С ТРОССОВЫМ ПРИВОДОМ	50
<i>Согомонян К.Л., Шарова О.А., Виноградова А.С., Пелевина Д.А.</i> РАВНОВЕСИЕ СФЕРИЧЕСКОГО НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ТЕЛА В КАПЛЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	51
<i>Согомонян К.Л., Шарова О.А., Виноградова А.С., Пелевина Д.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ШАРА В КАПЛЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В ОДНОРОДНОМ НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	52
<i>Володин И.В., Алабужев А.А.</i> ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В НАКЛОННОМ СЛОЕ	53
<i>Давлетишин А.И.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СЛАБОНЕСФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ С ЦЕНТРАМИ НА ОДНОЙ ПРЯМОЙ	54
<i>Давлетишин Р.П., Трушников Д.Н.</i> УЧЕТ ЭФФЕКТА СМАЧИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	55
<i>Давыдов М.А., Черепанов И.Н., Кондрашов А.Н., Гончаров М.М.</i> ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИИ НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА ПРИ НАГРЕВЕ СНИЗУ	56
<i>Демьянов М.А., Бычков О.П.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ НЕСИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКОЙ	57
<i>Хасанов Д., Диева Н.Н., Кравченко М.Н., Имамова Е.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРА	58
<i>Елистратов С.А., Сибгатуллин И.Н., Ерманюк А.Г.</i> ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ АСПЕКТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ФОНЕ ВОЛНОВЫХ АТТРАКТОРОВ	59
<i>Бритов А.Д., Ярикова С.П., Потапов И.И., Епихин А.С., Сибгатуллин И.Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГРЕБНОГО ВИНТА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЯВЛЕНИЙ В ПАКЕТЕ OPENFOAM	60
<i>Ереев М.Н., Ершова М.И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТАЛИ ПУТЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОБРАТИМОЙ ОТПУСКНОЙ ХРУПКОСТИ	61

<i>Фатталов О.О., Любимова Т.П., Филиппов Л.О., Филиппова И.В.</i> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ РАЗЛИЧНОЙ КРУПНОСТИ	62
<i>Фокиева Н.О., Башмаков Р.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДАВЛЕНИЯ И ДЕБИТА СКВАЖИНЫ С ГРП В СЛУЧАЕ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ	63
<i>Гайфуллин Р.Ю., Мусабилов И.И., Сафаров И.М., Галеев Р.М., Асылбаева Р.А., Алиев А.М., Гаджиев А.Б.</i> ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА	64
<i>Гарбуз М.А.</i> ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВОРОТА ВИБРАЦИОННОГО РОБОТА ВОКРУГ ВЕРТИКАЛИ	65
<i>Гареев Л.Р., Ашуров Д.А., Веденеев В.В., Иванов О.О.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМОДАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В КРУГЛОЙ ЛАМИНАРНОЙ СТРУЕ	66
<i>Герасимов О.В., Рахматулин Р.Р., Шарафутдинова К.Р.</i> АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОСТНЫХ ОРГАНОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА	67
<i>Голдобин А.А., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Попов Е.С., Селетков Б.С.</i> ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ НАГРЕТЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ	68
<i>Долматова А.В., Голдобин Д.С.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ ГОРИЗОНТОВ В ЗАТОПЛЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ КОЛЕБАНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ	69
<i>Голованов С.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА- ТРИМАРАНА ПРИ ЕДИНСТВЕННОМ УПРАВЛЯЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ	70
<i>Бойко А.В., Голуб А.П., Ерошин В.А., Самсонов В.А.</i> ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МАШИН, ДВИГАЮЩИХСЯ ПО ВОДЕ	71
<i>Гончаров М.М., Кондрашов А.Н., Голдобин А.А., Селетков Б.С.</i> ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИЧНОСТИ ЧАСТИЧНО НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА	72
<i>Зверев Н.А., Земсков А.В.</i> РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ ПОЛОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЦИЛИНДРА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	73
<i>Иванова А.Д., Балтин М.Э., Сабирова Д.Э., Балтина Т.В., Саченков О.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МЫШЕЧНОГО ТОНУСА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	74
<i>Иванов А.М., Беляев Ф.С., Волков А.Е., Беляев С.П., Реснина Н.Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ МАРТЕНСИТНОМ ПРЕВРАЩЕНИИ В СПЛАВЕ Ti₄₉Ni₅₁ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ	75
<i>Каменских А.А., Пащенко М.М.</i> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКНА ТИПА PANDA НА РАБОТУ УЗЛА	76
<i>Каменских А.А., Носов Ю.О., Седельникова С.С., Сахабутдинова Л.Р.</i> АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗУБА С КЛИНОВИДНЫМ ДЕФЕКТОМ ДО И ПОСЛЕ РЕСТАВРАЦИИ	77

<i>Лесникова Ю.И., Труфанов А.Н., Каменских А.А.</i> О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA	78
<i>Знаменская И. А., Карнозова Е. А., Руденко С.</i> ДИНАМИКА УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ СКОЛЬЗЯЩИХ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ РАЗРЯДОВ	79
<i>Айрапетов А.Б., Катунин А.В., Стрекалов В.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ КРЫЛА ПУТЕМ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В КОНЦЕВОМ ВИХРЕ ПРАНДТЛЯ	80
<i>Кильдибаева С.Р., Суюргулова Э.Э., Харисов Э.И.</i> ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ С УЧЁТОМ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ	81
<i>Кирюшина М.А.</i> КВАЗИГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА	82
<i>Колбнева Н.Ю.</i> АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ НЕЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ ВО ВНЕШНЕМ ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ	83
<i>Козлов М.В., Рыбкин К.А., Любимова Т.П., Кучинский М.О.</i> ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ	84
<i>Краснопольский Б.И.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СО СМЕШАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСЧЁТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ	85
<i>Красняков И.В., Браун Д.А.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ В УСЛОВИЯХ АНИЗОТРОПИИ	86
<i>Кучинский М.О., Любимова Т.П., Рыбкин К.А., Козлов М.В., Фаттахова И.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ И ИХ АГЛОМЕРАТОВ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ	87
<i>Куянова Ю.О., Дубовой А.В., Бервицкий А.В., Паршин Д.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСУДИСТОГО АНАСТОМОЗА НА ОСНОВЕ 0-D и 1-D ГЕМОДИНАМИКИ	88
<i>Куликов Д.А., Фомин М.Н., Шмелев Е.И.</i> РАСЧЕТ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛИ НАСОСА ОТ ДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ	89
<i>Куликов Ю.М., Долуденко А.Н.</i> ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ	90
<i>Хуррамов Ш.Р., Курбанова Ф.З., Алибоев К.Ю.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАЛКОВОГО ОТЖИМА	91
<i>Ледон Д.Р., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.</i> УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СПЛАВА ВТ6 В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЦИКЛОВ ДО РАЗРУШЕНИЯ	92
<i>Ляжсков С.Д., Кузькин В.А.</i> НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ЦЕПОЧКЕ ГУКА СО СВОБОДНЫМ КОНЦОМ	93

<i>Лисицын А.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ГРАНУЛИРОВАННЫМИ ПРЕГРАДАМИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ	94
<i>Ливенец З.Д., Луговский А.Ю.</i> ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В АККРЕЦИОННЫХ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКАХ	95
<i>Лоечко Д.С., Шеремет М.А.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ПСЕВДОПЛАСТИЧНОЙ НАНОЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ И ПОРИСТЫМИ РЕБРАМИ	96
<i>Ереев М.Н., Лонин К.А., Панов В.А., Патрушев В.Л., Соловьев С.А.</i> ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА МЕХАНИЧЕСКОГО И ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА УЗЛОВ ГЕРМЕТИЗАЦИИ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК	97
<i>Луцкий В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И., Трифонов В.В.</i> ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ С ДИФфузорными КАНАЛАМИ	98
<i>Луцкий В.Г., Макарова М.С.</i> ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ПО ДЛИНЕ ЧИСЛОМ МАХА	99
<i>Маслов С.А., Натяганов В.Л.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТОРНАДО-ЦИКЛОНА	100
<i>Маслов С.А., Натяганов В.Л.</i> ЭЛЕКТРОКАПИЛЛЯРНАЯ ЛЕВИТАЦИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В КАСКАДЕ ПОД ВОРОНКОЙ СМЕРЧА	101
<i>Мельников Р.М., Сафарян К.А., Оглезнев А.А., Кондрашов А.Н.</i> ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	102
<i>Мещерякова А.Р., Горячева И.Г.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ В КОНТАКТЕ НЕИДЕАЛЬНО ГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	103
<i>Никитин В.Ф., Михальченко Е.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ	104
<i>Мишин А.В.</i> УЧЕТ ОБОБЩЕННОЙ ПРОИЗВОДНОЙ И КОЛЛЕКТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ФАЗ НА ПРОЦЕСС ГОМОГЕНИЗАЦИИ	105
<i>Мишустова З.П., Солдатов И.Н.</i> ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В УПРУГОМ СЛОЕ	106
<i>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Порязов В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШОК БОРА	107
<i>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Кантарбаева А.</i> ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗАКРЫТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ	108

<i>Мошева Е.А.</i> РАЗВИТИЕ КОНВЕКЦИИ ДВОЙНОГО СЛОЯ В ПРОТОЧНОМ МИКРОКАНАЛЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СМЕШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ	109
<i>Мошева Е.А., Козлов Н.В.</i> ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА ДИНАМИКУ СМЕШИВАЮЩИХСЯ РЕАГИРУЮЩИХ ДВУХСЛОЙНЫХ СИСТЕМ	110
<i>Нагичева Г.С., Нохрин А.В., Мелехин Н.В., Берендеев Н.Н., Брагов А.М., Баландин В.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ	111
<i>Насырова Д.А., Башмаков Р.А.</i> КОЛЕБАНИЯ СТОЛБА ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТОЙ СКВАЖИНЕ И СООБЩАЮЩЕЙСЯ С ПЛАСТОМ, ПОДВЕРЖЕННЫМ ГРП	112
<i>Ниценко В.А., Давлетбаев А.Я.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТНОЙ БАНКИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМОМ ГАЗОВОМ ПЛАСТЕ В СКВАЖИНЕ С ТРЕЩИНОЙ ГРП	113
<i>Каменских А.А., Носов Ю.О.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ЦИАТИМ-221	114
<i>Каменских А.А., Носов Ю.О., Струкова В.И.</i> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА РЯДОВ УГЛУБЛЕНИЙ ПОД СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ В ВИДЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЛУНОК ПОЛИМЕРНОЙ ПРОСЛОЙКИ ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОСТОВ	115
<i>Каменских А.А., Панькова А.П., Носов Ю.О.</i> АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЧЕТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ОТ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА	116
<i>Окатьев Р.С., Фрик П.Г., Соколов Д.Д.</i> СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАЛОМОДОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМО ПАРКЕРА	117
<i>Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Дубовой А.В., Бервицкий А.В., Паршин Д.В.</i> ДИНАМИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ МАЛЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АСИМПТОМНЫХ АНЕВРИЗМ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ КРИТЕРИЯ РИСКА ИХ РАЗРЫВА	118
<i>Пенигин А.В., Афанасьев А.А., Беловус П.Н., Дымочкина М.Г., Веденеева Е.А., Гречко С.С., Павлов В.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИИ ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ И ОБСТАНОВОК ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РАЗМЕЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА	119
<i>Пешин С.Е.</i> ВЛИЯНИЕ СГИБАНИЯ ПАЛЬЦЕВ РУКИ НА КОМПРЕССИЮ СРЕДИННОГО НЕРВА В ЗАПЯСТНОМ КАНАЛЕ	120
<i>Петрушов А.А., Краснопольский Б.И.</i> ГИБРИДНЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ	121

<i>Бельчихина А.В., Пигусов Е.А., Кузин С.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ШЕСТИЛОПАСТНОГО ВОЗДУШНОГО ВИНТА НА БАЗЕ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА	122
<i>Подседерцев А.Н., Кондратьев Н.С.</i> ОПИСАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ	123
<i>Полякова П.В., Баимова Ю.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКОМКАННОГО ГРАФЕНА ДВУХ МОРФОЛОГИЙ	124
<i>Пономарев Р.Р., Алексеев М.С., Ганченко Г.С., Демехин Е.А.</i> ТЕЧЕНИЕ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА В МИКРО- И НАНОКАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	125
<i>Попов А.А., Болдин М.С., Чувильдеев В.Н., Щербак Г.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ТВЕРДОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ С ИЗГИБНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ	126
<i>Попов Е.С., Гончаров М.М., Буркова Е.Н., Юрина А.Д.</i> ФАКТОР ФОРМЫ В ЗАДАЧАХ О СЕГРЕГАЦИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ	127
<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А.</i> ЭФФЕКТЫ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА	128
<i>Попович С.С., Леонтьев А.И., Виноградов Ю.А.</i> ТЕПЛООТДАЧА В ОБЛАСТЯХ ОТРЫВА И СЛЕДА СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ	129
<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ПАНОРАМНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ	130
<i>Попов В.А., Алексеев М.С., Ганченко Г.С., Демехин Е.А.</i> РАЗДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ МАКРОМОЛЕКУЛ В РАСТВОРЕ ЭЛЕКТРОЛИТА В НАНОКАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	131
<i>Потапов Д.И., Потапов И.И.</i> О РАЗВИТИИ ПЕСЧАНОГО ПОЙМЕННОГО БЕРЕГА РЕКИ	132
<i>Потапов И.И., Петров А.Г., Бритов А.Д., Епихин А.С., Чжан Ц.</i> О РЕВИЗИИ РУСЛОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДНА, ИМЕЮЩЕГО КРИТИЧЕСКИЕ УКЛОНЫ	133
<i>Рафикова Г.Р., Каримова Г.Р.</i> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ СТОУНЛИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОДЫ И ПЕСКА, НАСЫЩЕННОГО ВОДОЙ ИЛИ ГАЗОГИДРАТОМ	134
<i>Ремизов И.Д.</i> РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ	135
<i>Рыбкин К.А., Любимова Т.П., Кучинский М.О., Фаттахова И.А.</i> МЕХАНИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФЛОТАЦИИ КВАРЦА	136
<i>Сафарян К.А., Голдобин А.А., Трефилов И.А., Мельников Р.М.</i> РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТОВОЛОКОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	137
<i>Сафина Л.Р., Баимова Ю.А.</i> МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ГРАФЕН-МЕТАЛЛ	138

<i>Селетков Б.С., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Голдобин А.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ВНУТРЕННЕГО НЕОДНОРОДНО НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА НА КОНВЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАЗОРЕ	139
<i>Семенова Е.В., Шарафутдинова К.Р., Саченков О.А.</i> ТЕНЗОР ЧЕТВЕРТОГО РАНГА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	140
<i>Селиверстов Г.В., Серегина А.А.</i> МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ	141
<i>Сёмин Ф.А., Галушка В.А., Цатурян А.К.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АРИТМОГЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТКАНИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ	142
<i>Потапов И.И., Петров А.Г., Епихин А.С., Сибгатуллин И.Н.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНОВОГО РУСЛОВОГО ПОТОКА НАД НЕСВЯЗНЫМ ДНОМ	143
<i>Сиренко А.Г., Сутырин О.Г.</i> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМ ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЬОМ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ВБЛИЗИ ТВЁРДОЙ СТЕНКИ	144
<i>Смирнова В.В., Саченков О.А.</i> АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК	145
<i>Могилевский Е.И., Смирнов К.В.</i> ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫЕ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОГО СЛОЯ, ТЕКУЩЕГО ПО ВРАЩАЮЩЕМУСЯ ДИСКУ	146
<i>Могилевский Е.И., Смирнов К.В.</i> ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ	147
<i>Сомов С.А., Иванов А.С.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИЧИЙ КОНВЕКЦИИ В СУХОМ И ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ	148
<i>Старцев Н.И., Никитин Н.В.</i> СУБГАРМОНИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА, ПЕРИОДИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОГО В НАПРАВЛЕНИИ РАЗМАХА	149
<i>Стеклов А.С.</i> ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ	150
<i>Сухов А.Д., Петров А.Г., Сибгатуллин И.Н., Епихин А.С.</i> ЛАМИНАРНОЕ ОБТЕКАНИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КОНТУРОВ ПОД УГЛОМ АТАКИ	151
<i>Сутырин О.Г.</i> УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГОРЮЧЕМ ГАЗОВОМ ПУЗЫРЕ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ	152
<i>Тихвинский Д.В., Карпенко А.А., Чупахин А.П., Паршин Д.В.</i> ГЕМОДИНАМИКА БИФУРКАЦИОННОЙ АНЕВРИЗМЫ АБДОМИНАЛЬНОГО ОТДЕЛА АОРТЫ	153
<i>Тимош П.С., Потапов И.И.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЗНОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МЕЛКОЙ ВОДЫ	154

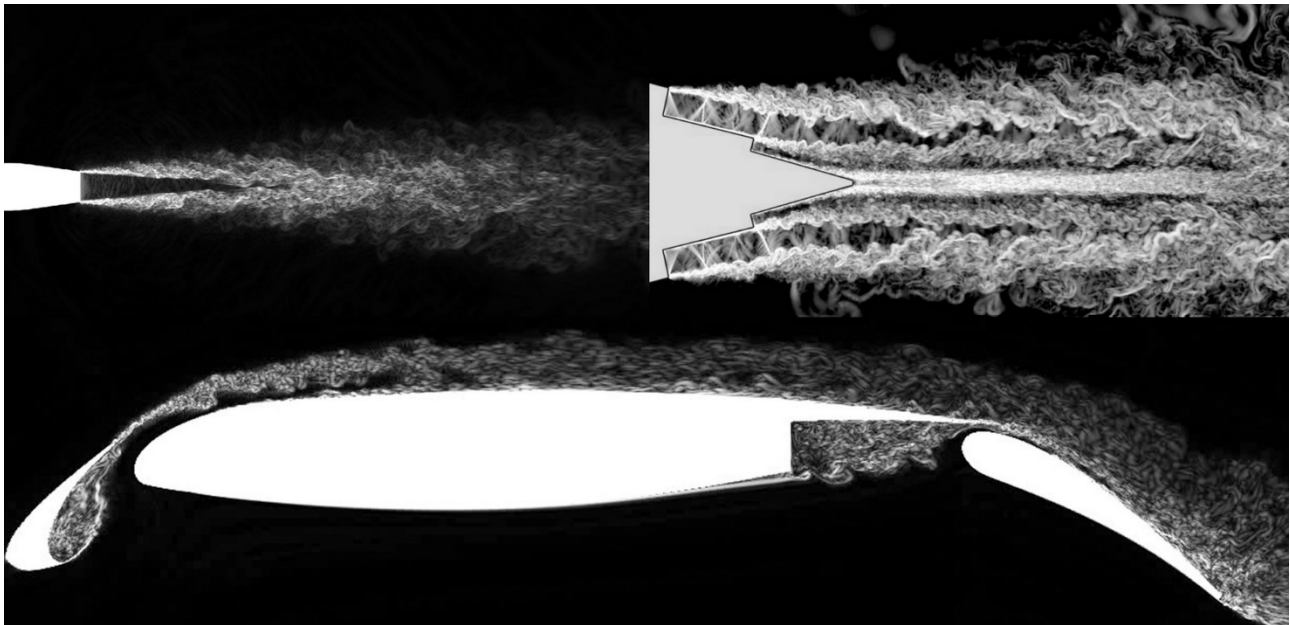
<i>Тюлькина И.В., Голдобин Д.С.</i> ФАЗОВОЕ ОПИСАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В СМЕЖНЫХ ЯЧЕЙКАХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ	155
<i>Трефилов И.А., Юрина А.Д., Сафарян К.А., Мельников Р.М.</i> РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	156
<i>Трифонов В.В., Решмин А.И., Луцик В.Г., Тепловодский С.Х.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА С ДИФфуЗОРНЫМИ И КОНфуЗОРНЫМИ КАНАЛАМИ	157
<i>Тургунов К.К., Аннаев Н.У., Холтураев Ф.С.</i> КОНТАКТНЫЕ УГЛЫ ДВУХВАЛКОВЫХ МОДУЛЕЙ	158
<i>Тюбаева П.М., Ольхов А.А., Попов А.А.</i> МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКНИСТЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ И МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК	159
<i>Хабибуллина А.Р., Сёмин Ф.А., Цатурян А.К.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА: ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ СТИМУЛЯЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ЕГО НАСОСНУЮ ФУНКЦИЮ	160
<i>Харин Н.В., Большаков П.В., Саченков О.А., Герасимов О.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОСТНОГО ОРГАНА ПО ДАНЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ	161
<i>Цгоев Ч.А.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРОЙ ФАЗЫ ИНФАРКТА МИОКАРДА	162
<i>Чернова А.А.</i> ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ ФАЗ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ	163
<i>Чернышов А.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМАГНИТНОЙ КОНВЕКЦИИ В МАГНИТНОМ КОЛЛОИДЕ	164
<i>Чулюнин А.Ю.</i> О СТАБИЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ И ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК	165
<i>Чурикова А.В., Носов Ю.О., Розов С.Г.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯГА ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАПЫЛЕНИИ ПОСАДОЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАЗЦА И КОНТРЕЛА	166
<i>Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ АЭРОЗОЛЯ РАЗНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СЕЧЕНИЕМ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА	167
<i>Баишаков Р.А., Шамматова А.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СМЕНЫ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ДЕБИТОМ СКВАЖИНЫ И ПЕРЕПАДОМ ДАВЛЕНИЯ В ТРЕЩИНЕ ГРП	168
<i>Шарифуллина Т.С., Черевко А.А., Остапенко В.В.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМБОЛИЗАЦИИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ	169

<i>Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Скрипкин С.Г.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ГАЗО-ВИХРЕВОМ БИОРЕАКТОРЕ	170
<i>Шкалей И.В., Буковский П.О.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ТОРМОЗОВ	171
<i>Юрина А.Д., Банников М.В., Трефилов И.А., Попов Е.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-3 ПРИ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ	172
<i>Юсупова Н.Р., Крылова К.А., Мулюков Р.Р.</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВА 36Н	173
<i>Яковенко А.А., Горячева И.Г.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВЯЗКОУПРУГИМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ ДВУХУРОВНЕВОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ШТАМПОВ	174

ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ НА ГИБРИДНЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

Горобец А.В., Дубень А.П.
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва
e-mail: gorobets@keldysh.ru

Представляемый на конференции доклад будет посвящен технологии вихреразрешающего моделирования сжимаемых турбулентных течений в задачах вычислительной аэродинамики и аэроакустики. Ключевыми компонентами вычислительной технологии являются численные схемы повышенной точности на неструктурированных смешанных сетках [1,2]; современные гибридные незонные подходы к моделированию турбулентности [3,4]; масштабируемый гетерогенный параллельный алгоритм и переносимая программная реализация с многоуровневым распараллеливанием на основе стандартов параллельного программирования MPI, OpenMP и OpenCL [5]. В докладе будет уделено внимание всем этим компонентам. Также будут представлены примеры расчетов задач механики сплошной среды на гибридных суперкомпьютерах и достигаемые в них показатели параллельной эффективности и производительности.



Примеры моментальных картин течения из вихреразрешающих расчетов:
струйные течения, внешнее обтекание крыла с механизацией.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 19-11-00299, с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова и суперкомпьютеров, установленных в Суперкомпьютерном Центре коллективного пользования ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

1. Abalakin I., Bakhvalov P., Kozubskaya, T. Edge-based reconstruction schemes for unstructured tetrahedral meshes // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2016. 81. 331–356.
2. Bakhvalov P. A., Kozubskaya T. K. EBR-WENO scheme for solving gas dynamics problems with discontinuities on unstructured meshes // Computers & Fluids. 2017. 157. 312–324.
3. Guseva E., Garbaruk, A., Strelets M. K. Assessment of Delayed DES and Improved Delayed DES Combined with a Shear-Layer-Adapted Subgrid Length-Scale in Separated Flows // Flow, Turbulence and Combustion. 2017. 98. 481–502.
4. Pont-Vilchez A., Duben A., Gorobets A., Revell A., Oliva A., Trias F.-X. New strategies for mitigating the gray area in delayed-detached eddy simulation models // AIAA Journal. 2012. 50 (9). 3331–3345.
5. Gorobets A., Bakhvalov P. Heterogeneous CPU+GPU parallelization for high-accuracy scale-resolving simulations of compressible turbulent flows on hybrid supercomputers // Computer Physics Communications 2022. 271. 108231.

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОСМАЗЫВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Горячева И.Г.

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

e-mail: goryache@ipmnet.ru

Многокомпонентные антифрикционные сплавы и композиционные материалы широко используются в трибосопряжениях для снижения силы сопротивления в условиях фрикционного взаимодействия [1,2]. Такие материалы, как правило, состоят из матрицы (твердая фаза) и включений (мягкая фаза). Антифрикционный эффект в условиях контактного взаимодействия основывается на выделении мягкой фазы на поверхность композита при его взаимодействии с контртелом и формировании тонкой пленки смазочного материала (третьего тела), которая не только снижает коэффициент трения между взаимодействующими телами, но и предотвращает схватывание поверхностей и задиры в критических режимах трения, связанных с повышением давлений и температур в области контактного взаимодействия.

В данном исследовании рассмотрено фрикционное взаимодействие композиционного материала, состоящего из нескольких структурных элементов, отличающихся различными механическими и прочностными характеристиками, с поверхностью шероховатого контртела и предложена модель выделения на поверхность трения мягкой составляющей композиционного материала (рис. 1). Модель основана на анализе напряженного состояния и распределения температуры в композиционном материале на макроуровне (расчет осредненных величин внутренних напряжений с учетом микрогеометрии контактирующих тел и условий взаимодействия, в том числе фрикционного разогрева), а также на расчете напряжений, возникающих в структурных составляющих рассматриваемого материала [3].

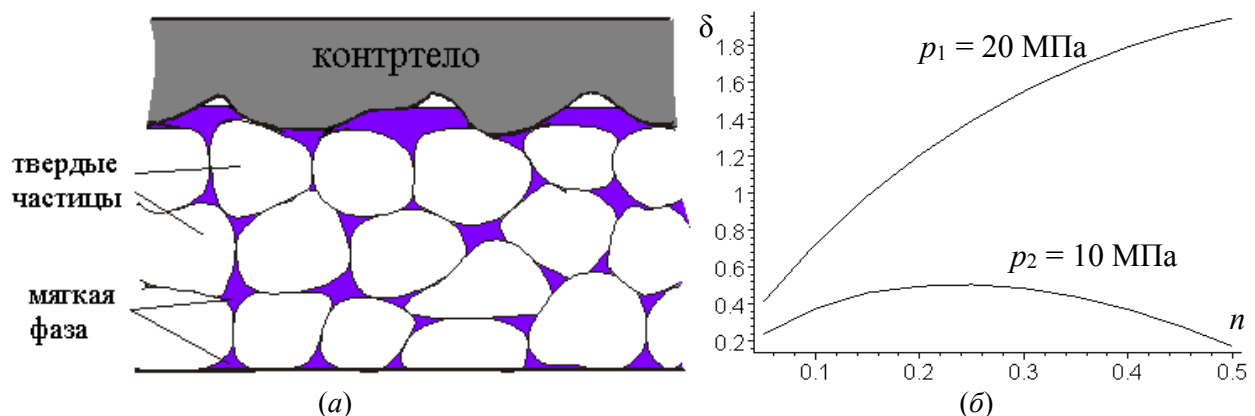


Рис.1. Схема контакта (а) и зависимости (б) средней толщины δ образующейся на поверхности пленки от концентрации n мягкой фазы (для двухкомпонентного сплава) при разных номинальных давлениях p_i в области контактного взаимодействия

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-49-02010.

1. Alexeyev N. and Jahanmir S. Mechanics of friction in self-lubricating composite materials: Mechanics of second-phase deformation and motion. // Wear, 166, 1993.

2. Kurbatkin I.I., Bushe N.A., Goryacheva I.G. and Zaichikov A.V. Influence of antifriction aluminium alloy composition on protected film formation in contact interaction, Friction and Wear, 27, No 4, 2006.

3. Маховская Ю.Ю., Горячева И.Г. Моделирование выделения мягкой фазы на поверхность многокомпонентного алюминиевого сплава при трении // Физическая мезомеханика. 2016, Т. 19, № 1, С. 15–23.

МЕТОДЫ ПАНОРАМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТИ ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Знаменская И.А.

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: znamen@phys.msu.ru

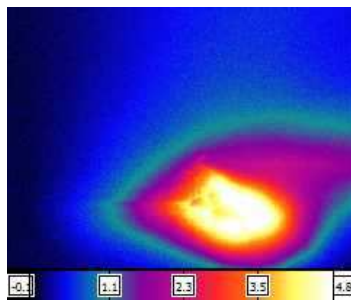
Доклад посвящен анализу современных достижений в области панорамной регистрации, обработки, анализа динамических процессов в механике жидкости, газа, плазмы, реализующихся в природе и технике. Рассмотрены как физические основы методов экспериментальной визуализации потоков, так и основы современных технологий цифровой обработки изображений и анимаций.

В работах последнего десятилетия отмечается стремительное развитие математических методов компьютерной обработки, средств, технологий распознавания и анализа панорамных изображений структурных элементов и параметров динамических и статических полей, позволяющих получать количественную информацию о различных потоках. Анализируются базовые публикации, описывающие применение современных методов научной визуализации потоков.

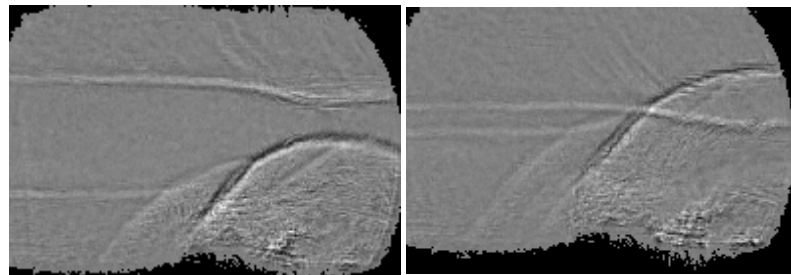
Особое внимание уделено методам, использующим кросс-корреляционные алгоритмы обработки изображений: цифровое трассирование (PIV), теневой фоновый метод (ТФМ), беззасветные методы трассирования (SIV), измерение скорости в вязких покрытиях, микро PIV и др.

Затрагивается актуальная проблема анализа цифровых данных панорамного эксперимента - проблема больших данных, получаемых с использованием современных цифровых высокоскоростных камер в оптическом и инфракрасном диапазоне. Приводятся примеры использования на физическом факультете методов машинного обучения при анализе больших массивов данных теневой съемки быстропротекающих газодинамических процессов.

Рассмотрены примеры визуализации данных численного моделирования, имитирующих эксперимент и преимущества их прямого сравнения с экспериментальными данными. Описывается созданная в МГУ виртуальная «Галерея научных фотографий и видео».



(1)



(2)

Рис. 1. Инфракрасная съемка обтекаемого препятствия (1) и последовательные кадры теневой съемки ударно-волнового течения высокоскоростной камерой (2).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ 22-29-00652.

1. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор. Научная визуализация, 2021, Т. 13, № 3, С 125 - 158, DOI: 10.26583/sv.13.3.13.

2. Волков К.Н., «Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике» Москва: Физматлит, 2018. - 356 с.

МЕХАНИКА В РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

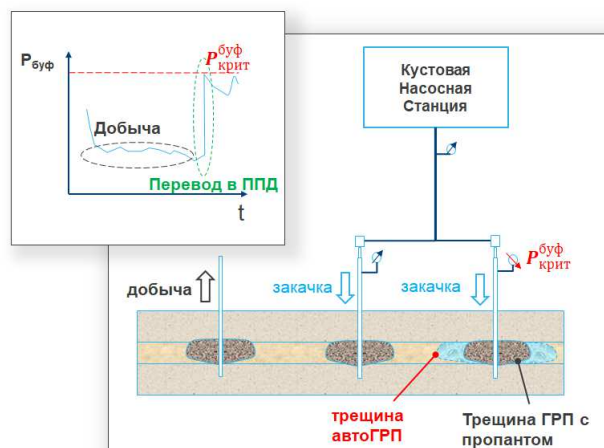
Калинин С.А.

ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург
e-mail: Kalinin.SA@gazpromneft-ntc.ru

В настоящее время наблюдается снижение коэффициента извлечения нефти на месторождениях по всему миру, поэтому перед научным и инженерным сообществом встает вопрос разработки новых технологий повышения нефтеотдачи. Если раньше, например, исследователи и инженеры ограничивались только изучением фильтрационно-емкостных свойств месторождений, а также свойств пластовых флюидов, то рост числа нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов вынуждает исследовать механические и прочностные свойства пород. В частности, для извлечения нефти сейчас необходимо использовать технологии, сопряженные с риском неконтролируемого разрушения пород, что является предметом геомеханики.

При геомеханическом моделировании бурения скважин основным вызовом является корректный подбор плотности бурового раствора, применяемого при бурении. Если плотность бурового раствора будет выбрана некорректно, то появляются значительные риски обрушения, либо разрыва стенок ствола скважины, сопровождаемые опасными газонефтеводопроявлениями.

Классическим способом интенсификации добычи стал гидроразрыв пласта (ГРП), позволяющий создавать в продуктивном пласте трещину, увеличивающую площадь притока нефти, а значит и дебит добывающих скважин. Управление процессом ГРП является довольно сложной инженерной задачей, которую невозможно решить без хорошего понимания геомеханики.



Геомеханика находит применение и при управлении процессами поддержки пластового давления, когда для поддержания темпов добычи в пласт закачиваются различные агенты (вода, либо ПАВ-Полимерное заводнение), вытесняющие нефть по направлению к добывающим скважинам. В процессе закачки воды в нагнетательную скважину часто появляется риск разрыва горных пород с образованием т.н. «трещины автоГРП». Процесс автоГРП является плохо контролируемым и сопряжен с рядом проблем (непроизводительная закачка, изменение коэффициента вытеснения, преждевременное обводнение пластов и т.п.).

Приведенные примеры показывают, что изучение механизмов разрушения горных пород требует не только проведения массы лабораторных экспериментов, но и подробного физико-математического моделирования этих процессов. Особенную сложность представляет тот факт, что требуется решать т.н. связанные задачи, когда для адекватного математического описания процесса требуется не просто отдельно решать задачи фильтрации и упругости, а, например, пороупругости. Кроме того, необходимо привлекать модели появления и развития трещин, механику разрушения горных пород. Большим вызовом становится выбор адекватных численных методов решения таких задач, поскольку требуется совместно решать различные типы уравнений. Из-за большой размерности задачи требуются методы ускорения решений, которые можно достичь как за счет распараллеливания процессов, так и за счет выбора оптимальных сеток.

1. Sergey Kalinin, Dmitry Karavaev, Anna Sapetina. The Parallel Implementation of the Adaptive Mesh Technology in Poroelastivity Problems, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9_36.

ДИНАМИКА МАССЫ И ЭНЕРГИИ

Кривцов А.М.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра великого, Санкт-Петербург

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

e-mail: akrivtsov@bk.ru

Анализируется волновой перенос энергии в неоднородной системе взаимодействующих частиц. Изучается эволюция произвольного возмущения конечной энергии, показывается, что подобные возмущения могут рассматриваться как энергетические тела, описываемые законами, аналогичными законам классической механики, действующими для материальных тел. Эффективная масса, импульс, момент инерции и другие величины, характерные для материальных тел, вводятся для тел энергетических. На Рис. 1 показан энергетический вихрь как пример энергетического тела, совершающего вращательное движение. Аналогия между переносом массы и переносом энергии используется для разработки математических инструментов, позволяющих использовать уравнения классической динамики вещества для описания динамики энергии.

Показано, что, подбирая определенным образом параметры системы, возможно получить для переноса энергии уравнение, аналогичное уравнению динамики материального тела в гравитационном поле. При этом сгусток энергии может вести себя либо как волна, либо как частица. Обсуждаются приложения энергетической динамики для описания процессов в других областях современной физики, предлагается качественное объяснение некоторых открытых научных вопросов.

Доклад основан на результатах, опубликованных в работах [1,2].

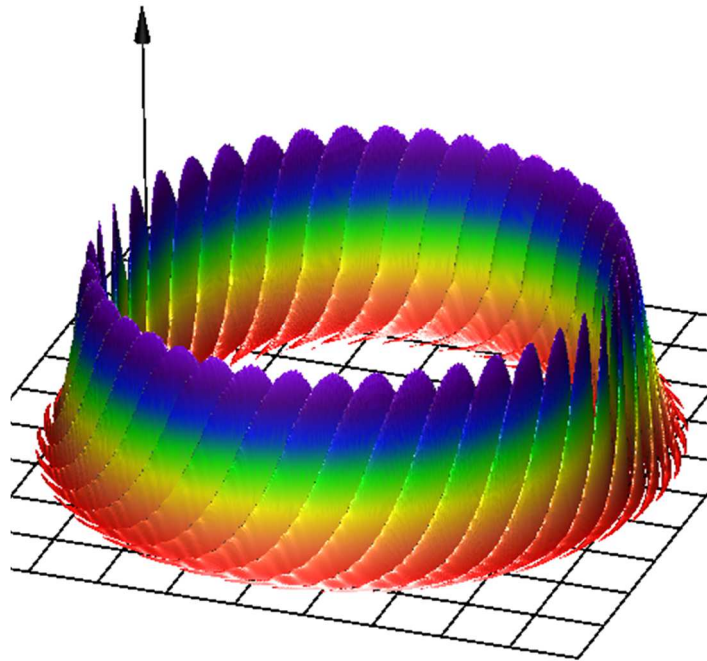


Рис.1. Энергетический вихрь в двумерном кристалле (расчеты Н.М. Бессонова).

1. A.M. Krivtsov. Dynamics of matter and energy. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 2022.

2. V.A. Kuzkin, A.M. Krivtsov. Unsteady ballistic heat transport: linking lattice dynamics and kinetic theory. Acta Mechanica. 2021, 32(5), 1983–1996.

КОНВЕКЦИЯ В НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЯХ

Любимова Т.П.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

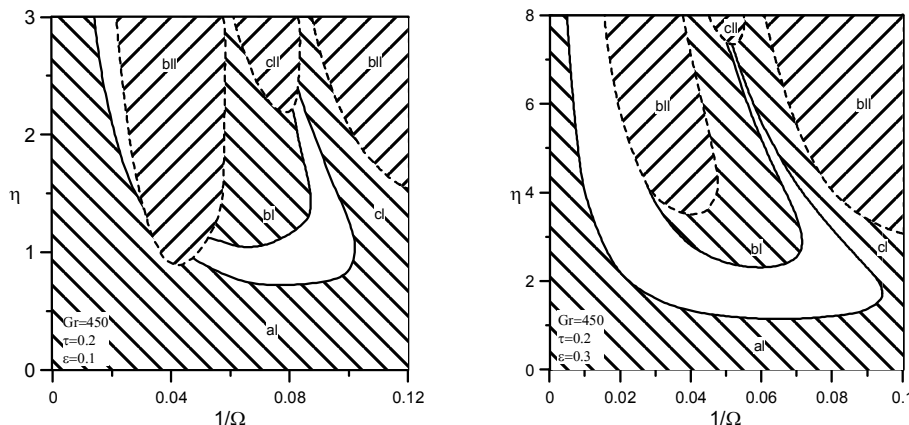
²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: lyubimovat@mail.ru

Многие жидкости, участвующие в природных и технологических процессах, являются реологически-сложными. Поведение таких жидкостей во многих ситуациях качественно отличается от поведения ньютоновских жидкостей, что необходимо учитывать при анализе гидродинамических процессов и разработке способов управления ими. В докладе обсуждаются математические модели, методы и результаты моделирования свободной тепловой конвекции в неньютоновских жидкостях и влияние на них переменных внешних воздействий.

В первой части доклада рассматриваются нелинейно-вязкие и вязкопластические жидкости. Большое внимание уделяется математическим моделям и методам численного моделирования неоднородных течений в таких жидкостях. Обсуждаются условия устойчивости механического равновесия, характер возбуждения и нелинейные режимы конвекции в нелинейно-вязких и вязкопластических жидкостях при подогреве снизу, условия возникновения течений и структура зон квазитвердого движения в вязкопластических жидкостях в замкнутых полостях при горизонтальном градиенте температуры. Рассматривается влияние зависимости реологических параметров от температуры. Анализируется применение вибраций в качестве средства управления режимами конвекции и их устойчивостью.

Вторая часть доклада посвящена свободной тепловой конвекции в вязко-упругих жидкостях. Подробно обсуждаются методы численного моделирования неоднородных течений в таких жидкостях. В отличие от ньютоновских жидкостей, в спектре возмущений механического равновесия вязкоупругих жидкостей при подогреве снизу имеются колебательные возмущения, при временах релаксации, превышающих некоторое значение, они являются наиболее опасными. В докладе рассматриваются устойчивость механического равновесия, характер возбуждения и надкритические режимы конвекции в вязко-упругих жидкостях в подогреваемых снизу замкнутых полостях. Анализируются результаты, полученные в рамках обобщенной модели, переходящей в различных предельных случаях в модели Фан-Тьен-Таннера, Максвелла, Олдройда и Джеффриса. Рассматривается поведение решений вблизи точек пересечения бифуркационных поверхностей. Обсуждается влияние модуляции силы тяжести на условия устойчивости и нелинейные режимы конвекции.



Границы устойчивости механического равновесия вязкоупругой жидкости на плоскости параметров обратная частота модуляции $1/\Omega$, амплитуда модуляции η для $Pr=7$, $Gr=450$, $t=0.2$ и двух значений отношения времени запаздывания деформаций к времени релаксации напряжений ε . Сплошная и штриховая линии соответствуют границам устойчивости по отношению к возмущениям разной симметрии; al – основная зона неустойчивости, bl, bll – субгармонические резонансные области, cl, cll – синхронные резонансные области.

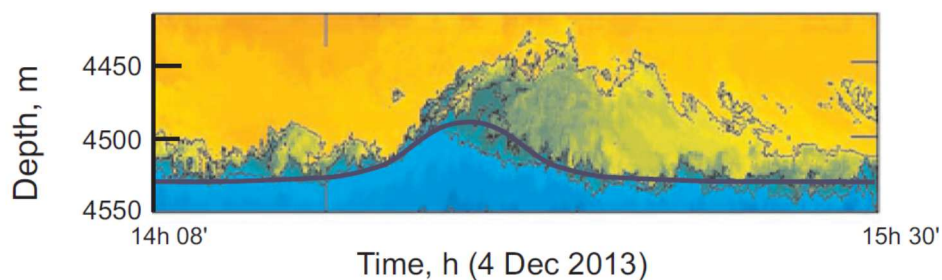
ГИДРОДИНАМИКА ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Макаренко Н.И.

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

e-mail: makarenko@hydro.nsc.ru

Холодные придонные течения, формирующиеся в полярных областях и направленные к экватору, являются в настоящее время объектом активного изучения в океанологии [1]. Изучение структуры и динамики этих потоков тесно связано с развитием методов математического моделирования [2], базирующихся на результатах натурных измерений. Задачи о расслоенных течениях в условиях глубоководной стратификации даже без учета вязких и диффузионных свойств морской воды являются существенно многопараметрическими. Продуктивным здесь оказывается путь построения иерархии приближенных моделей, позволяющих описать характерные свойства рассматриваемого класса явлений. Этот класс включает такие эффекты, как блокировка потока донным препятствием и генерация волновых следов за ним, формирование гидравлических прыжков и критических слоев при обтекании неровного дна, расщепление присклонных гравитационных течений.



Уединенная волна в придонном течении во входном каньоне разлома Романш (экватор), подверженная неустойчивости Кельвина–Гельмгольца.

Ряд недавних новых результатов относится к задаче о распространении внутренних волн с учетом аномально слабой глубоководной стратификации [3,4]. В рамках построенной нелинейной дисперсионной модели длинноволнового приближения типа уравнений Грина–Нагди охарактеризованы параметрические области существования солитоноподобных внутренних волн, граничащие с областями сдвиговой неустойчивости. Маргинальная устойчивость нелинейных волновых структур объясняет механизм образования экстремально длинных вихревых серий в придонных расслоенных течениях в глубоководных разломах Атлантики.

Данные исследования поддерживаются грантом РФФИ 21-71-20039 «Глубоководная гидродинамика: математические модели и натурный эксперимент»

1. Morozov E., Tarakanov R., Demidov A., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: water structure and flows. Dordrecht: Springer, 2010.

2. Gavriluk S.L., Makarenko N.I., Sukhinin S.V. Waves in Continuous Media / Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing. Cham, Switzerland: Birkhauser, 2017.

3. Makarenko N.I., Maltseva J.L., Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ivanova K.A. Internal waves in marginally stable abyssal stratified flows // Nonlin. Processes Geophys. 2018. V.25. P. 659–669.

4. Макаренко Н.И., Мальцева Ж.Л., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю., Иванова К.А. Внутренние стационарные волны в глубоководных стратифицированных течениях // ПМТФ. 2019. Т.60, №2. С. 74–83.

МЕХАНИЗМ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ

Никитин Н.В.

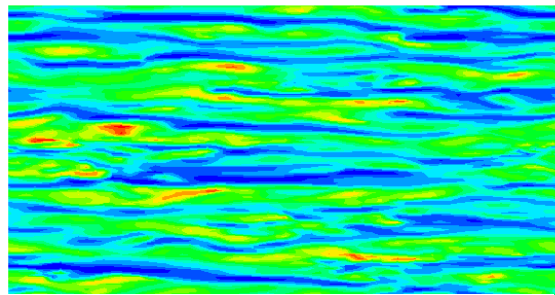
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: nvnikitin@mail.ru

Согласно оценкам Международного энергетического агентства, до 25% всей вырабатываемой в мире энергии тратится в конечном итоге на движение жидкости в трубопроводах и каналах, а также на движение транспортных средств в водной и воздушной среде. Значительная доля этой энергии диссипируется в тепло турбулентностью в окрестности твёрдых стенок. Кроме того, пристенная турбулентность ответственна за почти 5% выбросов CO₂. Таким образом, поиск эффективных средств снижения турбулентного трения имеет огромный экономический, экологический и социальный потенциал. Этим объясняется непрекращающийся интерес к теме сокращения турбулентного трения и продолжающиеся активные научные исследования во многих лабораториях мира.

В настоящее время можно считать доказанным, что поддержание турбулентности вблизи твёрдых стенок связано с наличием в потоке долгоживущих крупномасштабных структур в виде вытянутых вдоль течения полос ускоренного и замедленного движения, чередующихся в боковом направлении (см. рисунок).

Такое распределение скорости неустойчиво и порождает мелкомасштабные флуктуации, нелинейное взаимодействие которых поддерживает существование полосчатых структур. Предложено множество моделей образования полосчатых структур в пристенной области турбулентного течения, однако консенсуса в этом вопросе до сих пор не достигнуто. Наиболее популярная точка зрения связывает образование полос в распределении продольной скорости с наличием слабых квазипродольных вихрей – структур, преимущественное движение в которых происходит в плоскости, перпендикулярной направлению основного потока.



Мгновенное распределение скорости в пристенной области турбулентного течения.

Действуя на фоне градиента основной скорости, такие вихри переносят медленные частицы жидкости из пристенной области во внешнюю часть потока, где образуются полосы замедления. А в смежных областях наоборот, быстрые частицы внешнего потока переносятся к стенке, образуя полосы замедления. Такой механизм называют лифт-ап эффектом. Отметим, что описанная картина не объясняет причину возникновения организованных структур, а лишь переносит проблему с полос на квазипродольные вихри. Так или иначе, можно условно выделить три стадии цикла поддержания пристенной турбулентности: турбулентные пульсации возникают в результате неустойчивости крупномасштабного полосчатого движения, которое образуется под действием квазипродольных вихрей посредством лифт-ап эффекта. В свою очередь генерация вихрей происходит из мелкомасштабных пульсаций в результате некоторого нелинейного процесса. Можно надеяться, что разрыв или затруднение любого из трёх перечисленных звеньев гипотетического цикла поддержания пристенной турбулентности приведёт к снижению её интенсивности, и, как следствие, к уменьшению трения на стенке.

В докладе будут представлены некоторые имеющиеся в настоящее время методы снижения турбулентного трения, в том числе и исследованные автором доклада в работах [1-3]. Будет предложено объяснение действенности этих методов, очерчены перспективы их развития и практического использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 22-21-00184.

1. Никитин Н.В. Турбулентное течение в канале с искусственным двумерным пристенным слоем // Изв. РАН, МЖГ. 2003. №6. С. 32–40.

2. Никитин Н.В. О механизме подавления турбулентности боковыми осцилляциями обтекаемой поверхности // Изв. РАН, МЖГ. 2000. №2. С. 37–44.

3. Водопьянов И.С., Никитин Н.В., Чернышенко С.И. Снижение турбулентного сопротивления боковыми колебаниями оребренной поверхности // Изв. РАН, МЖГ. 2013. №4. С.46–56.

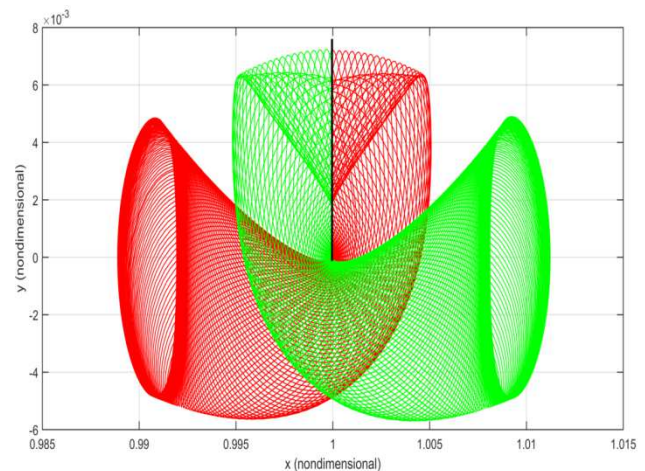
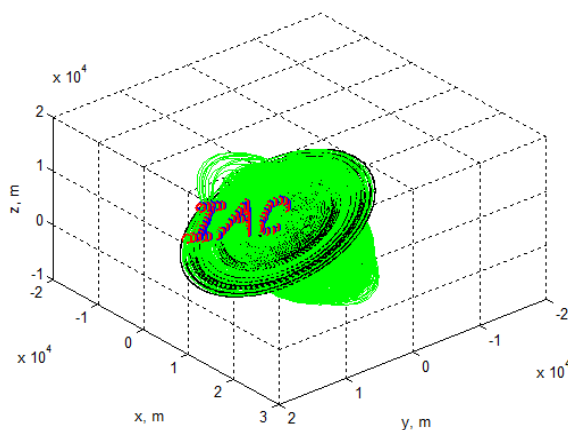
МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ И ДАЛЬНОГО КОСМОСА. ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Овчинников М.Ю.

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

e-mail: ovchinni@keldysh.ru

Появление малых космических аппаратов (МКА) в последней декаде прошлого века привело к революционному переосмыслению парадигмы полета в космос – на чем лететь, как разрабатывать, конструировать, изготавливать, испытывать, кто это должен и может делать, какие полезные задачи можно возложить на МКА и, в конце концов, как управлять их движением, обеспечивая решение поставленных задач с учётом новых ограничений и особенностей их создания и эксплуатации. Пионерские работы были выполнены, как и следовало ожидать, в университетах. Именно там сконцентрирована инициативная, ищущая, зачастую без комплексов и зашоренностей, но и не обладающая необходимыми знаниями и практическим опытом творческая рабочая сила.



Если говорить о предмете нашего исследования – динамике и управлении движением, то использовались раскрываемые гравитационные штанги со сферическим магнитным демпфером, гистерезисными стержнями, токовыми катушками, аэродинамические стабилизаторы, постоянные магниты с гистерезисными стержнями, стабилизация собственным вращением с нутационным демпфером. Состав датчиков и актюаторов во многом определялся слабой энергетикой и низкими мощностями бортовых вычислительных средств, поэтому доминировали пассивные или полупассивные методы ориентации. Об управлении орбитальным движением речи и не шло. Но активно рождались старт-ап'ы, стали проявлять интерес к МКА и большие фирмы. Технологии создания МКА совершенствовались, появилась достаточно мощные бортовые компьютеры, энергоёмких аккумуляторы и эффективные солнечные батареи. Это способствовало внедрению активных способов ориентации, ранее бывших прерогативой больших КА. Энергетики стало хватать на обеспечение работы маховиков и токовых катушек, магнитометров, звездных камер и, главное, достаточно мощных бортовых компьютеров, что позволило эффективные алгоритмы идентификации движения и управления реализовывать на борту в режиме реального времени. Появление малогабаритных реактивных двигателей привело, наконец, к реализации многоспутниковых систем – как типа конstellация (созвездий), когда МКА развоятся по орбите, образуя сети для решения задач навигации, наблюдения Земли, интернета вещей, так и типа формаций, когда аппараты летят в непосредственной близости друг от друга, решая совместную задачу по принципу распределенной системы. Те и другие требуют управления относительным положением, ибо гравитационное поле Земли, в основном за счёт полярного сжатия, разрушает и весьма эффективно изначально выстроенную конфигурацию. Наличие движителей как активных, так и использующих эффекты сопротивления атмосферы, электромагнитного взаимодействия, позволяет решать задачи поддержания заданной пространственной конфигурации и переконфигурирования в зависимости от требований полезной нагрузки. Следует отметить, что конstellации на базе МКА уже реализованы или реализуются, но формации пока носят демонстрационный характер, за исключение, пожалуй, парных спутников типа GRACE, выполнявшие гравиметрические измерения. Отдельно стоят МКА для межпланетных перелетов. С точки зрения динамики необходимо уметь решать проблему отлёта от планеты старта и

торможения у планеты назначения. При наличии у МКА двигателя малой тяги типа электрореактивного двигателя можно уйти по спиральной траектории из сферы действия и после перехода в сферу действия планеты назначения также по спирали приблизиться к ней. Так летал европейский SMART. Однако радиационные условия около Земли все равно требуют доставки МКА на достаточно высокую орбиту, чтобы за время "раскрутки" спирали аппарат не успел набрать критическую дозу радиации. Если же есть возможность "уйти" от Земли попутным запуском на разгонном блоке или, как на планируемой сейчас миссии с использованием SLS, уйти с КА Орион, то возникнет задача торможения у планеты назначения. Усилий двигателя малой тяги здесь недостаточно - он просто не успеет затормозить МКА и тот перейдет в сферу влияния Солнца. Кстати, в этом случае Солнце может и помочь - ведь надо уменьшить константу энергии в ограниченной задаче Земля-Луна-МКА и внешнее гравитирующее тело - Солнце вполне этому может помочь. Требуются расчеты и весьма точные, чтобы МКА, совершив гравитационный маневр около Луны, ушел к Солнцу, которое затормозит его настолько, чтобы, вернувшись в систему Земля-Луна, сблизиться Луной и оказаться захваченным ее гравитационным полем. Правда, двигатель малой тяги все равно понадобится чтобы помочь Солнцу снизить значение константы Якоби и выстроить нужную орбиту вокруг Луны и поддерживать ее на окололунном этапе миссии. Интересные идеи привносит использование инвариантных многообразий, возникающих в окрестности неустойчивых точек либрации в задаче трех тел.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00256, <https://rscf.ru/project/19-11-00256/>.

О СВЕРХСХОДЯЩИХСЯ ЧИСЛЕННЫХ СХЕМАХ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Петров А.Г.

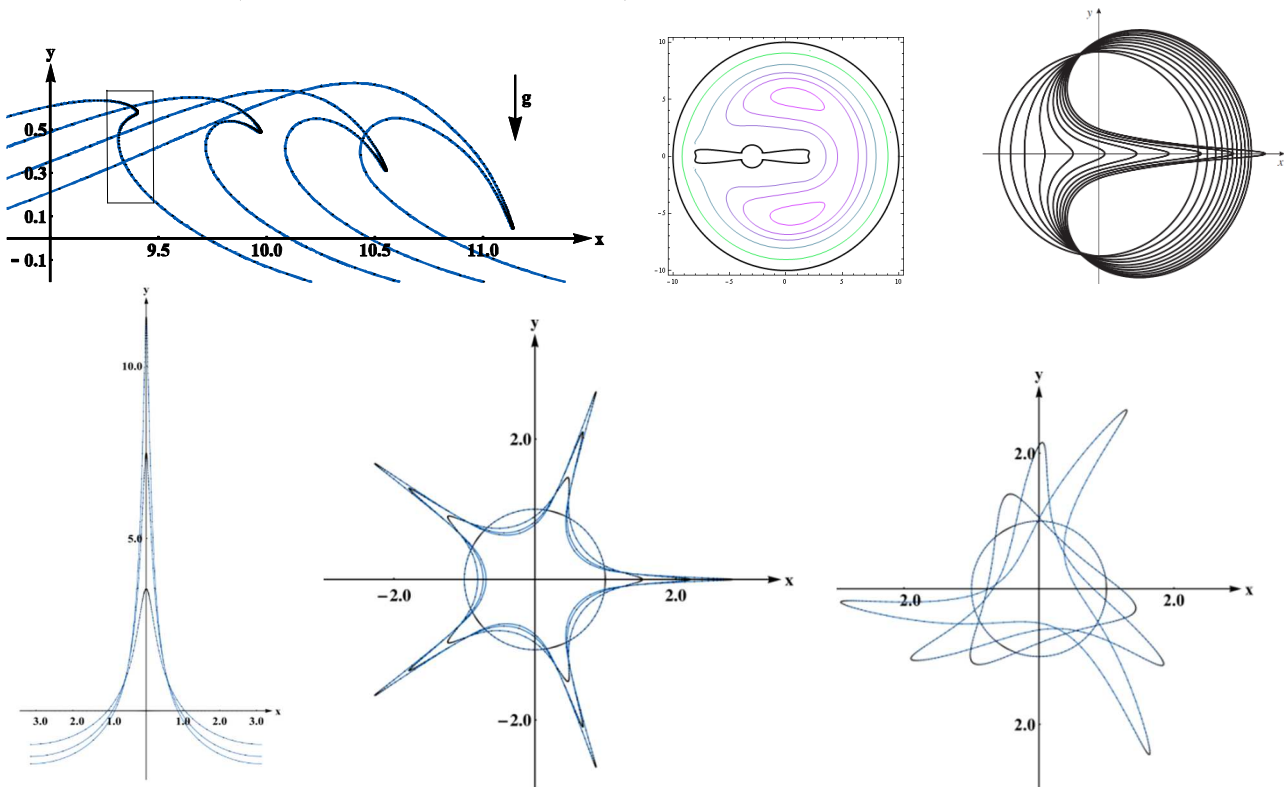
Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского, Москва
e-mail: petrovipmech@gmail.com

Речь пойдет о методе решения краевой задачи, в котором она сводится к интегральному уравнению на границе расчетной области. Обычно он применяется для решения задач Дирихле, Неймана и смешанной задачи для уравнения Лапласа. Примерами таких задач являются потенциальные течения жидкости, задачи электро- и магнитостатики, задачи распределения температуры. Также метод граничных элементов применяется для решения краевых задач для бигармонического уравнения. Такие задачи возникают в теории упругости и течений вязкой жидкости и в других разделах теоретической физики.

Для двумерных областей, ограниченных замкнутым контуром, возникает необходимость построения квадратурных формул для вычисления линейных интегральных операторов с логарифмическими особенностями. Интегральные операторы действуют на функции, определенные на замкнутых контурах. Функции имеют период равный длине контура. Представлен алгоритм вывода квадратурных формул вычисления линейных операторов, действующих на периодические функции с экспоненциальным убыванием погрешности по числу элементов сетки.

Применение выведенных квадратурных формул демонстрируются на решении ряда задач гидродинамики: обтекание решеток, задачи о кумуляции струй, обрушение волн, задачи течения вязкой жидкости в многосвязных областях, задачи теории упругости. На рисунках приведены решения задач: обрушение волны, кумуляции струй в опыте Покровского и при растекании капель, сравнения с точными решениями, модель миксера. Расчеты можно проводить с любой заданной точностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН, проект № 21-57-53019.и по теме гос. задания (№АААА-А20-120011690138-6).



1. Петров А.Г. Алгоритм построения квадратурных формул с экспоненциальной сходимостью // Изв. ВУЗов. Математика,. 2021. № 2. С. 86-92.
2. Байков Н.Д., Петров А.Г. Об обрушении капиллярно-гравитационных волн и формировании кумулятивных струй//ПММ. 2020.Т.84, № 5, с. 554-569.
3. Петров А.Г., Казакова А.О. Расчет течения вязкой жидкости между двумя произвольно движущимися цилиндрами произвольного сечения//ЖВМ и МФ. 2019. Т. 59, № 6, с. 1063-1082.

ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

Смирнов Н.Н.^{1,2}, Тюренкова В.В.^{1,2}, Никитин В.Ф.^{1,2}

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

²Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований РАН», Москва

e-mail: mech.math.msu@inbox.ru

Все возрастающая активность Человечества в космосе привела к образованию на околоземных орбитах большого количества так называемого «космического мусора», представляющего собой различные объекты искусственного происхождения и их фрагменты, которые были некогда запущены в космос, а к настоящему времени оказались пассивными и не несущими более никакой полезной нагрузки по использованию, либо разрушились по различным причинам. Эти космические объекты размерами от десятков микрон до одного метра, движущиеся с орбитальными скоростями и остающиеся на орбите в течение многих лет, общее количество которых исчисляется миллионами, сформировали новую среду в околоземном пространстве выше стратосферы – пояс «космического мусора». На низких околоземных орбитах космический мусор сосредоточен в основном на интервале высот от 200 до 2000 км и уже в настоящее время представляет серьезную угрозу для космических полетов и долгосрочных орбитальных проектов.

На низких околоземных орбитах:



На геосинхронных орбитах:



Эффективная механическая защита космических аппаратов является острой проблемой, поскольку на полеты в космическом пространстве существенно влияет наличие космического мусора, особенно на низких околоземных орбитах и геосинхронных орбитах. Основная идея защиты космических аппаратов от сверхскоростных мелких (размером порядка 1 см) осколков заключается в том, чтобы каким-то образом рассеять энергию удара защитным слоем. Простое увеличение толщины корпуса космического аппарата неэффективно, так как при скоростях порядка километров в секунду глубина проникновения велика, а общий вес защитного экрана становится неприемлемым для практического использования.

Предложенная новая концепция гласит, что защита космического корабля с помощью сот из небольших газонаполненных контейнеров может сформировать гораздо более эффективный щит с меньшей массой. Как и в концепции многослойной защиты, в которой используются тонкие защитные элементы для многократного соударения с поражающим элементом с целью его разрушения и диспергирования, так и в новой концепции газонаполненного защитного экрана по-прежнему используется непрерывное воздействие сжатого газа, вызывающее замедление, нагрев, плавление, распыление и испарение осколков. Кроме того, использование множества последовательных слоев газонаполненных сферических сот позволяет увеличить площадь зоны перераспределения энергии удара, включая боковые и передние стенки сот, благодаря свойству газа передавать давление во всех направлениях, что обеспечивает значительное преимущество настоящей концепции по сравнению с многослойными щитами.

Газонаполненные защитные экраны могут быть многоразовыми, поскольку степень влияния утечки газовой фазы достаточно мала в течение характерного времени удара.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-11-00225.

1. Смирнов Н. Н., Киселев А. Б., Тюренкова В. В., Назаренко А. И., Усовик И. В. Анализ разрушения и фрагментации космических аппаратов при высокоскоростных столкновениях. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2020. № 11-12. С. 22–31.

2. Smirnov N. N., Kiselev A. B., Zakharov P. P., Muratov R. V., Bukharinskaya D. M. The usage of adaptive mesh refinement in simulation of highvelocity collision between impactor and thin-walled containment // Acta Astronautica. – 2022. Vol. 194, P. 401–410.

АЭРОУПРУГИЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ВЕРТОЛЕТА

Абдухакимов Ф.А., Веденеев В.В., Жидяев К.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: farruh.abduhakimov7@gmail.com

Флаттер лопастей несущего винта вертолета может привести к значительным повреждениям лопастей и крушению вертолета. В вертолетостроении России для прогнозирования флаттера используются два подхода. Во-первых, это метод Флоке, примененный к простой системе с двумя степенями свободы для сечения лопасти, который может предсказать флаттер только на простейших модах: на первых изгибных и первых крутильных модах [1, 2]. Второй подход, применяемый к высшим модам, заключается в осреднении поля течения по циклу вращения и анализе флаттера лопасти в нестационарном потоке [2] и, соответственно, не учитывает периодичность течения.

В настоящей работе разработан метод аэроупругого анализа лопасти [3], применимый к различным модам колебания и учитывающий периодичность течения. Метод включает в себя расчет статического состояния лопасти с учетом центробежных сил и геометрической нелинейности, расчет маховых колебаний и флаттера.

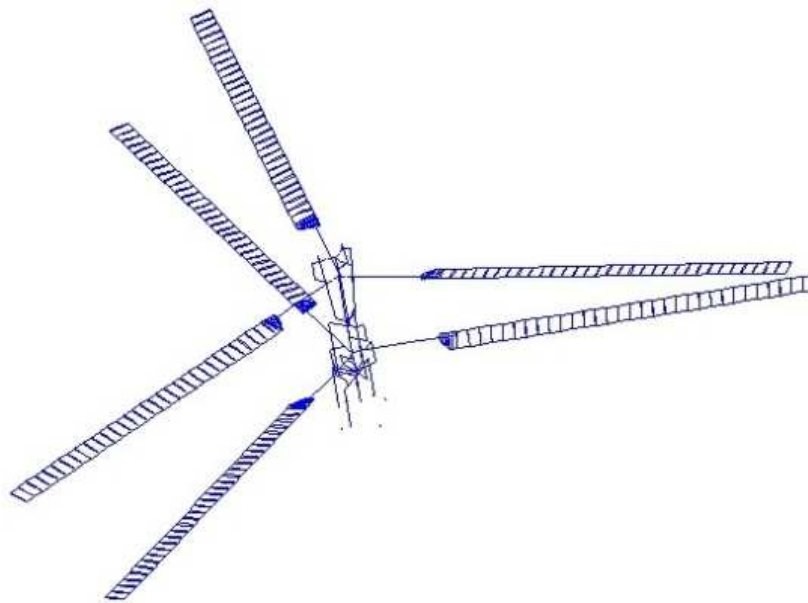


Рис. Общая динамическая модель несущей системы.

Разработано программное обеспечение для включения аэродинамики в конечно-элементную модель MSC.Nastran для решения как статических, так и динамических задач аэроупругости. Проведен аэроупругий анализ для различных режимов полета. Определены параметры возникновения или отсутствия флаттера, а также способы отстройки от флаттера.

1. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С. Вертолеты, расчет и проектирование. Том 1. Аэродинамика. Издательство Машиностроение, Москва, 1966.
2. Pavlenko N.S. Anisotropic rotor stability// 19th European rotorcraft forum. Cernobbio (Como) – Villa Erba, 1993.
3. Abdukhakimov F., Bondarev V., Dadunashvili S., Konovalov A., Vedeneev V. Advanced coupled aeroelastic analysis of helicopter rotor system// 45th European Rotorcraft Forum 2019 (ERF) Warsaw, Poland, 2019.

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В КРУГЛОЙ СТРУЕ С ДВУМЯ МОДАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Абдульманов К.Э., Никитин Н.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: abdulmanov.kirill@gmail.com

Проведено численное исследование устойчивости затопленной несжимаемой струи, вытекающей из круглого сопла в полупространство. Свойства жидкости в струе совпадают со свойствами жидкости в окружающем пространстве. Профиль скорости на срезе сопла совпадает с профилем скорости экспериментальной установки лаб. 103 НИИ механики МГУ. Исследования проведены при числе Рейнольдса $Re=UD/\nu=5700$ (U – средняя скорость, D – диаметр сопла). Эволюция струи вниз по потоку находится из решения осесимметричных уравнений Навье-Стокса. Найденное двумерное стационарное поле скорости (основное течение) исследуется на устойчивость по отношению к осесимметричным ($n=0$) и трёхмерным ($n \neq 0$) возмущениям.

Исследование устойчивости проводится в двух постановках: квазипараллельной и пространственной. В первом случае изменение струи вниз по потоку учитывается параметрически: профиль скорости в каждом из сечений считается независимым от продольной координаты x . Это позволяет искать возмущения в виде $\sim \exp[i(\alpha x - \omega t)]$, где волновое число α – комплексное, а частота ω – действительна. После дискретизации уравнений по радиальной координате задача сводится к отысканию собственных значений комплексной матрицы. Разработан итерационный алгоритм, позволяющий отыскивать комплексные собственные значения для каждого заданного действительного ω . Таким образом находятся коэффициенты пространственного нарастания возмущений вниз по потоку. Во второй, пространственной постановке, линеаризованные относительно возмущений уравнения Навье-Стокса решаются во всей двумерной области. Таким образом определяется эволюция возмущений вниз по потоку при каждой заданной частоте.

Проведенные расчёты позволили выявить две ветви неустойчивости, связанные с особенностями экспериментального профиля скорости на срезе сопла. Первая ветвь характеризуется большим коэффициентом нарастания возмущений и возникает из-за наличия точек перегиба в профиле скорости на периферии струи. Эта неустойчивость наблюдается только на начальном участке развития струи до $x/D \approx 3$. Вторая ветвь характеризуется меньшим коэффициентом нарастания возмущений, но сохраняется (при каждом фиксированном значении частоты ω) до больших удалений от сопла.

В работе получено качественное и количественное согласие с имеющимися экспериментальными данными. Определены возможности каждого из использованных подходов.

Проведено исследование нелинейной эволюции и взаимодействия возмущений разной формы. Показано, что переход к турбулентности возникает только при наличии трёхмерных возмущений. Определена зависимость протяжённости переходной области от частоты вносимого возмущения. Получено хорошее качественное согласие с экспериментом.

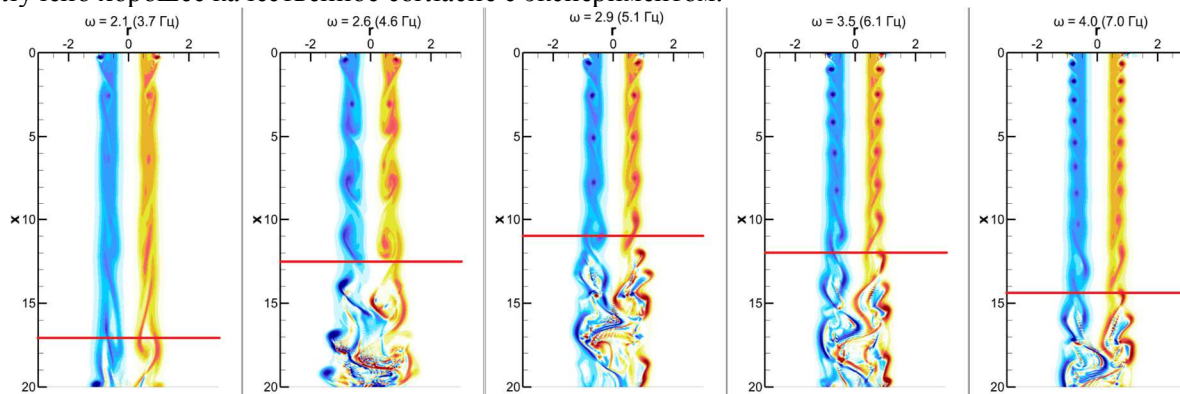


Рис. Визуализация перехода к турбулентности в зависимости от частоты вносимого возмущения.

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

ЗАКОН ПОДОБИЯ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ЗАКАЧКЕ CO₂ В НАКЛОННЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ

Афанасьев А.А., Веденеева Е.А., Гречко С.С.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Закачка и долгосрочное хранение парниковых газов, в частности, углекислого газа (CO₂), в водонасыщенных пластах является эффективным методом смягчения последствий изменения климата. Утилизация выхлопных газов может быть осуществлена с помощью нагнетательной скважины, использующей для закачки CO₂ в пласт (рис.). Закачка приводит к образованию газового плюма – насыщенной CO₂ области, расширение которой от скважины контролируется плавучестью газа в водонасыщенных породах. Менее плотный газ поднимается в верхние части водонасыщенного пласта и растекается под непроницаемой породой. Моделирование переноса газа с учетом всех механизмов его удержания в пласте очень важно для оценки последствий и потенциальных рисков утилизации. Потенциальным риском закачки является утечка CO₂ к поверхности Земли через старые, заброшенные скважины или разломы вблизи места закачки. Утечка может привести к загрязнению грунтовых вод или, в случае утечки в атмосферу, сделать утилизацию бесполезной. Наибольший риск представляют скважины, расположенные в направлении структурного наклона пласта, так как именно в этом направлении достигается максимум расстояния, на который газ распространяется от скважины.

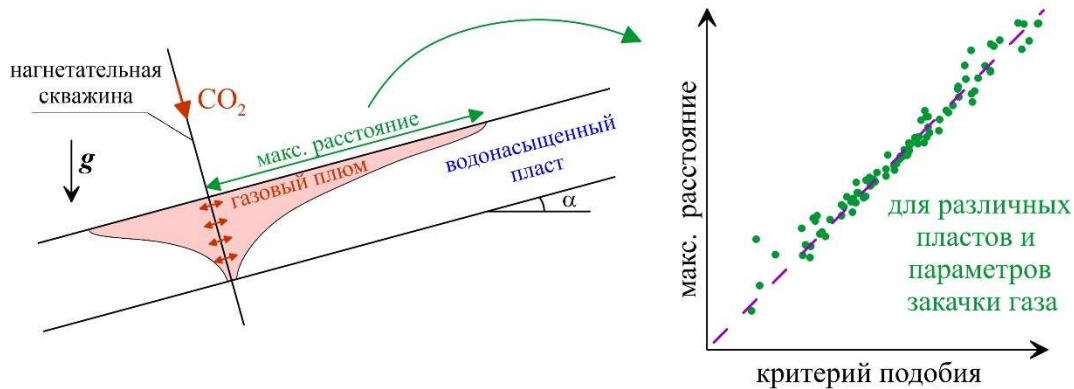


Рис. Схема исследуемого течения, связанного с закачкой CO₂ в наклонный водонасыщенный пласт.

Проведены исследования, позволившие определить критерий подобия, т.е. безразмерный параметр, характеризующий максимальное расстояние, на которое распространится газ в наклонном к горизонту пласте (рис.). Критерий подобия получен из системы законов сохранения, описывающих несмешивающуюся фильтрацию воды и газа, в предположении несжимаемости фаз и отсутствия фазовых превращений. Из безразмерной формы записи системы законов сохранения и фильтрации определены шесть критериев подобия, характеризующих течение газа и форму газового плюма. В результате детального анализа системы уравнений, описывающей фильтрацию, сделано предположение, что скорость распространения газа в направлении структурного наклона в основном зависит только от одного из шести параметров подобия, а влияние остальных пяти параметров незначительно на поздних этапах закачки газа.

Для проверки сделанного предположения проведено обширное параметрическое исследование размеров газового плюма. С применением трехмерного численного моделирования рассчитана закачка CO₂ в однородные водонасыщенные пласты, характеризующиеся различными толщинами, пористостью и анизотропной проницаемостью, кривыми относительной фазовой проницаемости и капиллярного давления, углом наклона пласта к горизонту, значениями начальных пластовых давлений и температур. Рассчитанные таким образом размеры газовых плюмов построены в зависимости от выбранного параметра подобия (рис.). Обнаружено, что все точки на плоскости хорошо группируются вдоль одной линии. Это подтвердило сделанное предположение о том, что скорость распространения в направлении структурного наклона пласта в основном зависит только от выбранного параметра подобия, а влияние остальных параметров мало.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-71-10051).

СВЯЗЬ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ И ТЕМПЕРАТУРОЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Агеев А.И., Вигдорович И.И., Манаенкова Т.А.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 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.

Установлена связь между скоростью и температурой в логарифмической области (интеграл Крокко) в виде двучленного разложения по малому параметру задачи, который имеет порядок числа Маха, вычисленного по динамической скорости и температуре газа на стенке. В нулевом приближении эта связь совпадает с известным уравнением Вальца. Проведено сопоставление с экспериментальными и расчетными данными.

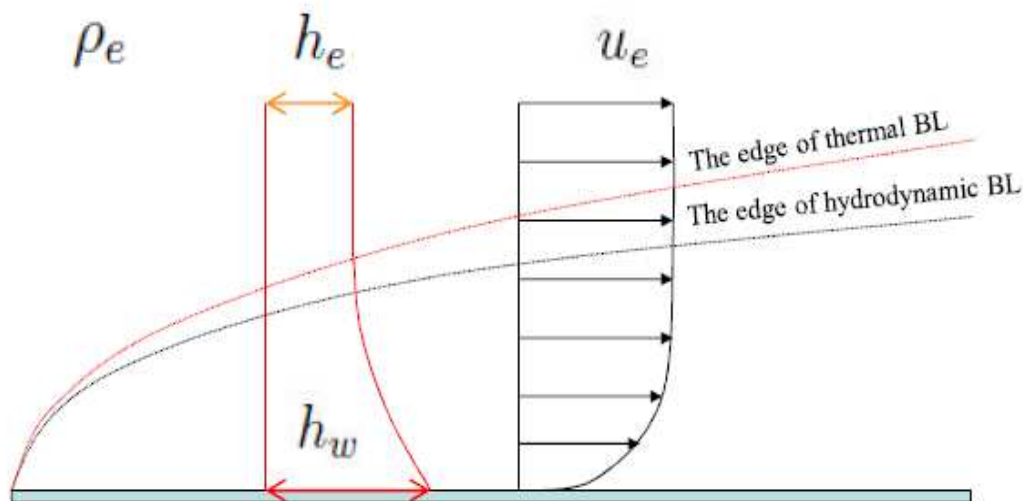


Рис. 1. Сверхзвуковой турбулентный пограничный слой на пластине.

Работа выполнена при поддержке РФФ (№ 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. Законы стенки для скорости и температуры в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2021, посвященная 60-летию первого полета человека в космос. Тезисы докладов (3 – 12 сентября 2021 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2021. – 161 с. – (Электронное издание сетевого распространения).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ НЕОДНОРОДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Акифьев К.Н.¹, Большаков П.В.^{1,2}, Семенова Е.В.¹, Харин Н.В.¹, Стаценко Е.О.¹,
Саченков О.А.^{1,2}

¹Казанский федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

e-mail: kirill.akifyev@mail.ru

В работе представлено устройство и метод для определения структуры материала или образцов при одноосном сжатии и представлен способ его использования. Представленное техническое решение предназначено для получения информации о структуре, механических свойствах неоднородных материалов и образцов, при проведении деформирования под действием одноосного сжатия, и сканирования с помощью рентгеновских излучений. Целью работы является реализация методики при нагружении образца и синхронизированном сканировании РКТ, а также методики обработки полученных данных.

Сущностью заявленного технического решения является устройство для определения структуры материала образца при одноосном сжатии. На свободные поверхности исследуемого образца предварительно размещается координатная сетка, над верхней крышкой на шпильки установлены четыре гайки для передачи сжимающего усилия. С помощью разработанного программного комплекса на основе данных компьютерной томографии определяют сетку представительных объемов, для назначенной сетки представительных объемов происходит автоматизированное определение эпюры перемещений. На основе поля перемещений определяют тензор деформаций для каждого представительного объема, далее для каждого объема, с учетом деформированного состояния, на каждом шаге нагружения определяют пористость, тензор структуры и тензор упругих констант. Для нахождения узловых точек сетки на образце на томографии был использован детектор углов Харриса для трехмерного случая. На представленное устройство и метод получен патент на изобретение [1].

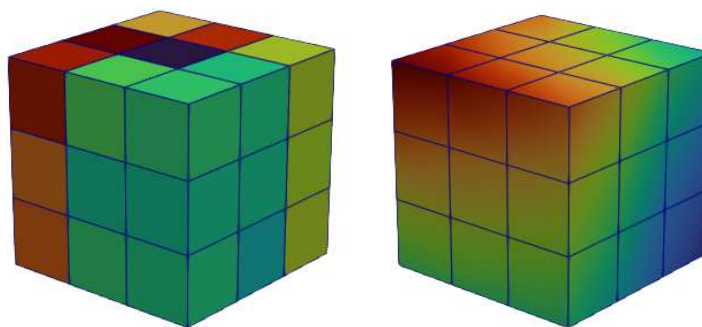


Рис. Эпюра пористости и поля перемещений.

Исследовались полимерные образцы различной пористости, с нанесенной на внешнюю поверхность сеткой из медной проволоки толщиной 90 микрон. Отдельно сегментировалась сетка на каждом шаге нагружения, после чего по найденным точкам поля перемещений производилась аппроксимация. По найденным аппроксимирующим функциям восстанавливались перемещения в представительных объемах, определялись тензор деформаций.

Эти действия проводились для каждого шага нагружения [2]. Таким образом, были получены данные о распределении структурных параметров образца, поле перемещений и деформаций.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-01-00535.

1. Саченков О.А., Большаков П.В., Герасимов О.В., Стаценко Е.О., Акифьев К.Н. Устройство для определения структуры материала или образцов при одноосном сжатии и способ его использования // Патент на изобретение 2755098 С1, 13.09.2021. Заявка № 2021103527 от 12.02.2021.

2. Большаков П.В., Акифьев К.Н., Шарафутдинова К.Р., Саченков О.А. Исследование структуры неоднородных образцов компьютерным томографом при осевом сжатии // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. сборник трудов, Москва. – 2021. – С. 16-22.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНАЛЬНОГО ШУМА НЕСУЩЕГО ВИНТА С ПОМОЩЬЮ КОДА “ГЕРБЕРА”

Акиншин Р.В.¹, Зайцев М.Ю.¹, Титарев В.А.^{1,2}, Фараносов Г.А.¹

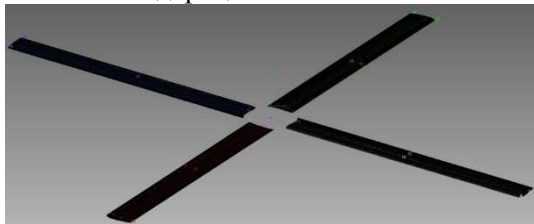
¹ФАУ “ЦАГИ”, Жуковский

²ФИЦ ИУ РАН, Москва

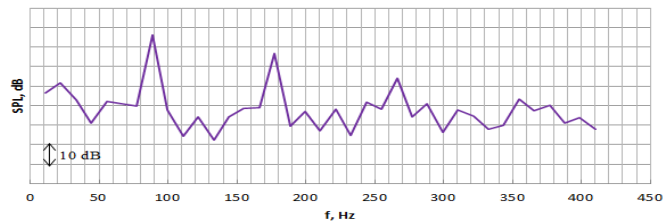
e-mail: akinshinrv@mail.ru

В ближайшее время одной из важнейших задач экономического развития России является развитие отечественного рынка гражданского вертолетостроения. В ближайших планах отечественной вертолетостроительной промышленности существенное обновление парка гражданских вертолетов, которые должны удовлетворять все более ужесточающимся требованиям к уровню шума на местности. В виду ограниченных возможностей акустического эксперимента для вертолетных винтов, в особенности – в условиях полета, актуальной является задача развития методов численного моделирования аэроакустических характеристик винтов.

В работе рассматривалась задача об определении аэроакустических характеристик четырехлопастного вертолетного винта на режиме висения на основе численного решения уравнений Эйлера. Для проведения расчетов использовался собственный параллельный вычислительный код “Гербера” [1], предназначенный для моделирования винтовых конфигураций [2,3] и валидированный в задачах моделирования шума самолетных винтов [3] с использованием результатов акустических измерений, проведенных в УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ “ЦАГИ”, модернизируемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению №075-11-2021-066.



(а)



(б)

(а) – упрощенная геометрия, используемая в расчете, (б) – численный расчет узкополостного спектра тонального шума в дальнем поле в плоскости винта.

Расчет проводился на подвижной неструктурированной тетраэдральной сетке, состоящей из порядка 55 миллионов ячеек. Для различных режимов работы винта была построена нестационарная картина его обтекания, рассчитаны тяга винта и его крутящий момент, сохранены временные реализации пульсаций газодинамических параметров на контрольных поверхностях, окружающих винт. На основе полученных данных с помощью собственного пакета по методу Фокса Вильямса-Хукинга были рассчитаны спектры шума в различных точках и проведено их сравнение с данными эксперимента [4], проведенного на открытом стенде. Показано, что численный расчет позволяет адекватно воспроизвести интегральные аэродинамические и аэроакустические характеристики винта. Это означает, что представленный метод может быть использован для поиска конфигураций лопастей с пониженным уровнем тональной составляющей шума.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект №21-71-30016).

1. Титарев В.А. Программный комплекс “Гербера” для расчета аэроакустических характеристик воздушных самолетных винтов. Свидетельство о регистрации программ N 2020616696 от 22.06.2020.

2. Belyaev I.V., Kopiev V.F., Skvortsov R., Pankratov I., Titarev V., Zaytsev M. Comparison of rotor noise measurement results in large-scale and small-scale anechoic facilities // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2015. AIAA 2015-2986.

3. Титарев В.А., Фараносов Г.А., Чернышев С.А., Батраков А.С. Численное моделирование влияния взаимного расположения винта и пилона на шум турбовинтового самолета // Акустический журнал. 2018. Т 64. № 6. С. 737-751.

4. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Макашов С.Ю., Аникин В.А., Громов В.В. Об определении акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов на открытом стенде // Акустический журнал. 2016. Т 62. № 6. С. 725-730.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРКОНЦЕНТРАЦИИ ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ МИКРОГРАНУЛЫ

Алексеев М.С.¹, Ганченко Г.С.², Мороз И.А.¹, Мареев С.А.¹

¹ Кубанский государственный университет, г. Краснодар

² Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Краснодар

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Проблема детектирования веществ из микропроб биологических жидкостей, связанная с малой концентрацией аналита, является одной из основных преград в проведении медицинских/химических анализов в подобных масштабах. Главной причиной этой проблемы является очень малая концентрация исследуемых веществ (молекулы ДНК, пептиды), из-за которой в области детектора статистически может не оказаться частиц, что приведёт к ложноотрицательному результату анализа.

Для решения этой проблемы можно заранее концентрировать исследуемые частицы в детектируемой области [1], выгодно использовать электрокинетические эффекты в жидкостях, проявляющиеся сильнее всего вблизи ионоселективных поверхностей [2]. В докладе будут представлены результаты численного моделирования концентрирования взвешенных микромолекул и наночастиц вблизи ионоселективной гранулы, которые также будут качественно сравниваться с полученными экспериментальными результатами в такой же постановке. В расчётах представлено моделирование микроустройства, состоящего из сферической внешней камеры, внутри которой помещена ионоселективная частица, сквозь внешнюю камеру протекает, в отличие от ранее рассмотренной задачи [3], тернарный электролит. Поток жидкости возникает за счёт как электроосмоса, так и градиента давления. В экспериментальной постановке используется аналогичная схема устройства, но с цилиндрической формой внешней камеры, что качественно не отражается на полученных результатах. В экспериментальной ячейке помимо исследуемой камеры также присутствуют электродные камеры, соединённые с исследуемой каналом.

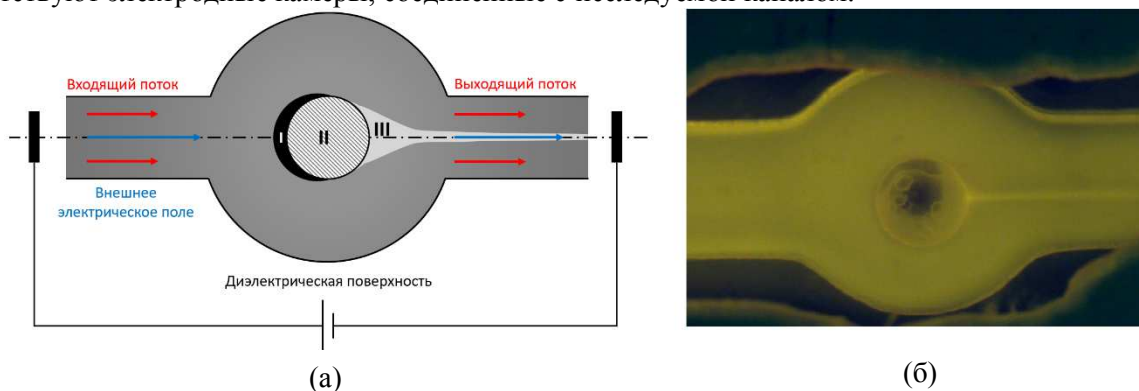


Рис. (а) Схема устройства. I – зона пространственного заряда вокруг микрогранулы, II – ионоселективная микрогранула, III – зона концентрированной струи частицы.

(б) Устройство экспериментальной постановки, соответствующее схеме (а).

Численное моделирование показало новые интересные эффекты концентрирования, вызванные значительным отличием в коэффициентах диффузии между хлором и красителем Rhodamine-6G. Численное моделирование также показало, что возможно регулировать толщину и общую концентрацию струи не только за счёт разности потенциалов, но и градиента давления. Данные явления удалось подтвердить с помощью проведённых экспериментов, которые качественно совпадают с ними.

1. Wang Y.-Ch., Stevens A. L. Han J. Million-fold preconcentration of proteins and peptides by nanofluidic filter // *Anal. Chem.* 2005 . 77 . P 4293-4299.

2. Shau-Chun Wang, Hsien-Hung Wei, Hsiao-Ping Chen, Min-Hsuan Tsai, Chun-Ching Yu, and Hsueh-Chia Chang. Dynamic superconcentration at critical-point double-layer gates of conducting nanoporous granules due to asymmetric tangential fluxes // *Biomicrofluidics*, 2008. V. 2, 014102.

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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ УПРУГОЙ ФЕРМОЙ

Алпатов И.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: alpatov.ivan@list.ru

Была рассмотрена задача моделирования грудной клетки пространственной упругой фермой. В частности, был смоделирован эффект «выпираания рёбер», который иногда проявляется при лечении килевидной деформации с помощью ортеза.

В пакете конечно-элементного анализа Ansys были разработаны две 3D-модели грудной клетки. Первая модель (Рис. 1а) состоит из 23 абсолютно твёрдых стержней, соединённых спиральными пружинами, препятствующими повороту стержней друг относительно друга. Также мы считаем, что места прикрепления к позвоночнику для рёбер с правой и левой сторон совпадают, неподвижны, и в этих шарнирах также присутствуют пружины. В этой модели учитываются три пары рёбер. Две верхних пары соединены грудиной, две нижних – хрящом. При приложении силы к нижней точке грудины (килю), так, чтобы грудина встала параллельно позвоночнику, произошло латеральное расширение грудной клетки, особенно нижней части. То есть, был продемонстрирован эффект «выпираания рёбер».

Вторая 3D-модель (Рис. 2b) была построена по КТ скану пациента с килевидной деформацией. Эта модель состоит из 78 абсолютно твёрдых стержней и таких же спиральных пружин, как и в предыдущей модели. В данной модели учитываются 9 пар рёбер и хрящевые соединения между ними. Грудина моделируется 4 твердыми стержнями. Эффект «выпираания рёбер» при давлении на киль показан на Рис. 1с.

Также была произведена оценка применимости конечно-элементного моделирования подобных стержневых конструкций в пакете Ansys. Для этого была решена задача равновесия 2-стержневой упругосоединённой системы под действием сжимающей силы в двух частных случаях. Затем было найдено решение с помощью Ansys и получена оценка сходимости и точности этого решения относительно теоретического.

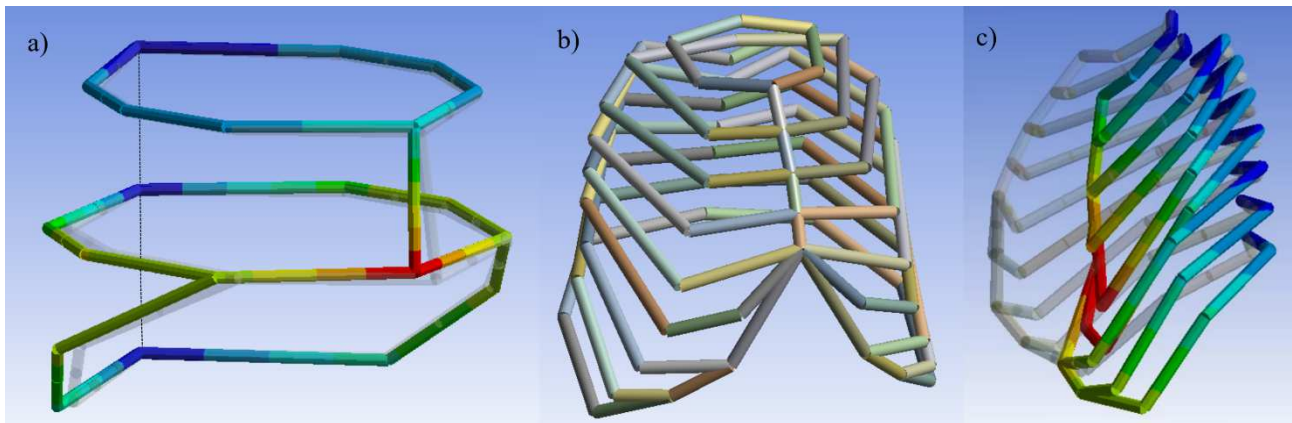


Рис. 1. а) Упрощённая модель грудной клетки, б) полная модель грудной клетки, в) деформация полной модели под действием силы, приложенной к килю.

1. Haje, S., Haje, D.: Overcorrection during treatment of pectus deformities with DCC orthoses: experience in 17 cases. *International Orthopaedics*. 30, 262-267 (2006). doi: 10.1007/s00264-005-0060-0.

2. Nagasao, T. et al.: Stress distribution on the thorax after the Nuss procedure for pectus excavatum results in different patterns between adult and child patients. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 134, 1502-1507 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2007.08.013>.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, РЕЖИМЫ И МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПО ВОДЕ КОЛЕСА С ГРУНТОЗАЦЕПАМИ

Амелюшкин И.А., Дружинин О.А.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Мос. обл.

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Исследование оптимальных режимов движения по воде на колесах, геометрических параметров грунтозацепов и теоретическое моделирование коэффициентов подъемной и пропульсивной сил представляет большой научный и практический интерес с точки зрения формы колес с грунтозацепами. В настоящей работе спроектированы и созданы экспериментальные установки, позволяющие исследовать режимы движения по воде на колесах. В зависимости от числа Фруда и безразмерной глубины погружения колеса образуется не менее трех основных режимов движения по воде на колесах: гребной, когда колесо медленно вращается в жидкости, практически не создавая подъемную силу; ударно-гребной – когда грунтозацепы отталкивают воду при частичном погружении колеса с грунтозацепами в воду и экраный – когда колесо полностью выходит из воды, нагнетая окружающий воздух в нижнюю часть колеса так, что грунтозацепы не касаются поверхности воды.

С помощью разработанной установки показано, что для заданной глубины погружения (величина которой не превышает диаметр) при превышении угловой скорости вращения колеса некоего критического значения аппарат выходит на режим вогнутого экрана, который сопровождается снижением волн и исчезновению брызг и потерей горизонтальной составляющей тяги. Получены аналитические и численные оценки зависимости удельной подъемной и пропульсивной сил от безразмерной угловой скорости вращения колес с грунтозацепами, показаны условия образования между колесом и поверхностью жидкости изогнутого воздушного экрана.

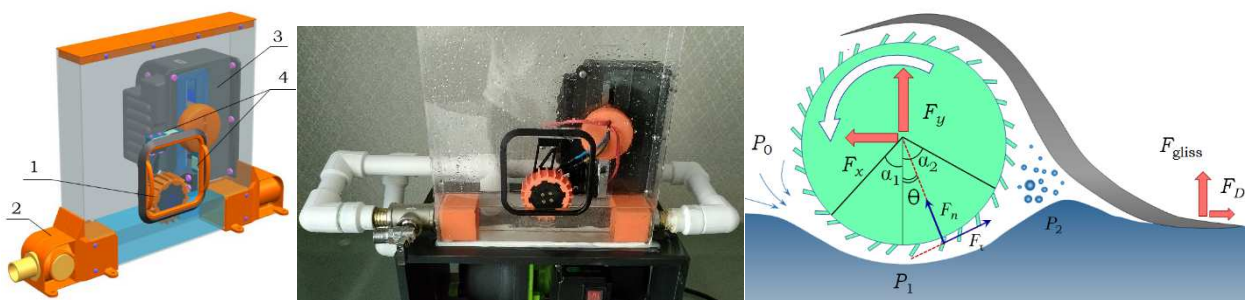


Рис 1: а) Схема и б) фотография экспериментальной установки: 1 – модель исследуемого колеса с грунтозацепами, 2 – гидродинамическая труба, 3 – координатник и силовая установка с регулируемыми оборотами, 4 – тензометрические весы; в) изображение образования изогнутого экрана под колесом.

1. Амелюшкин И.А., Дикий С.В., Дружинин О.В., Олексенко Н.К. Математическое моделирование, экспериментальная установка и результаты исследований качения тел по поверхности жидкости // *Материалы XXXI научно-технической конференции по аэродинамике*. М.: Изд-во ЦАГИ. – 29–30 октября 2020 г. – парк-отель Яхонты (Мос. обл., Богородский район).

МОДЕЛИ САЛЬТАЦИИ СНЕГА, ДИНАМИКИ КРИСТАЛЛОВ И ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ КАПЕЛЬ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

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

¹ Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Мос. обл.

² Московский физико-технический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Долгопрудный, Мос. обл.

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Модели процессов, сопровождающих обледенение представляет научный и практический интерес, в частности в задачах расчета и противодействию роста наледи на элементах конструкции летательного аппарата в условиях снега и метели. В настоящей работе определены зависимости концентрации, скорости и распределения частиц по размерам в пограничном слое воздушного потока у заснеженной поверхности в зависимости от основных управляющих параметров. Разработан численный алгоритм, проведена проверка результатов путем сопоставления с данными работ других исследователей. Развита модель динамики частиц сложной формы, показаны области на поверхности обтекаемого потоком, содержащим переохлажденные капли: в этих областях переохлажденные капли останутся жидкими после удара о поверхность: результаты зависят от числа Стокса аэрозольного потока.

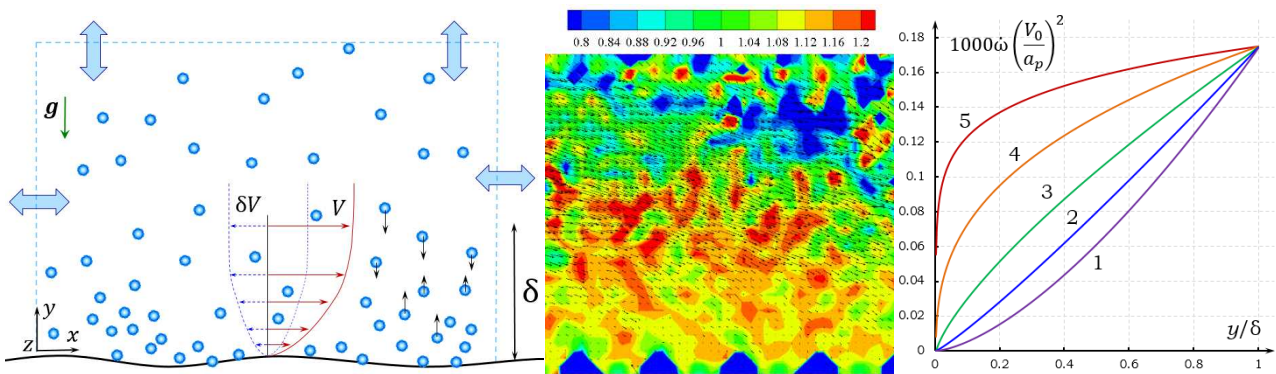


Рис. Слева – схема сальтации снега в пограничном слое газа, скорость которого состоит из средней (красный цвет) и пульсационной составляющих (синий цвет); в центре векторное поле скорости и – распределение частиц снега по размерам при скорости потока 5 м/с, средний объемно эквивалентный радиус частицы снега 0.1 мм, плотность снега 500 кг/м³; справа – зависимость углового ускорения частицы в сдвиговом потоке у поверхности обтекаемого тела, кривые 1–5 соответствуют $\alpha = 1; 0.75; 0.5; 0.25$ и 0.1 .

Выражение для безразмерного углового ускорения частицы плотностью ρ_p , движущейся со скоростью V_p в пограничном слое на высоте y от поверхности тела имеет следующий вид

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{15}{4\pi} \frac{\rho}{\rho_p} \sqrt{\frac{2}{\text{Re}_0}} \int_{\phi=0}^{\phi=\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \left[\left(\left(\frac{y + R \sin \phi \cos \theta}{\delta} \right)^\alpha - \frac{V_p}{V_\infty} \right) \cos \theta - \frac{\omega R}{V_\infty} \sin \phi \right] \sin \phi \, d\theta d\phi - f_{\text{dis}}(\text{Re}_\omega)$$

При моделировании распределения скорости потока в пограничном слое у поверхности показательной функцией расстояния частицы до поверхности получены аналитические выражения для распределения скорости и концентрации частиц в пространстве в зависимости от безразмерных управляющих параметров. В пограничном слое при неравномерном обтекании частица начинает вращаться в зависимости от профиля скорости, в частности при модели распределения скорости потока $u/V_\infty = (y/\delta)^\alpha$ оценка в пограничном слое толщиной δ значения максимальной угловой скорости

вращения частицы в сдвиговом потоке: $\frac{\omega R}{V_\infty} = \frac{1}{24\pi} \left(\frac{R}{h} \right)^2 \sqrt{\frac{\delta}{h}} \cong 0.01 \frac{R^2}{h^{2.5}} \delta^{0.5}$, где h – расстояние от частицы радиуса R до поверхности, обтекаемой ветром скоростью V_∞ .

Исследования выполнены при поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19–29–13024 и № 19–29–13016, а также в рамках Государственного контракта № 20411.1770290019 18.004 на НИР «Флагман 1».

1. Амелюшкин И.А., Кудров М.А., Морозов А.О., Щеглов А.С. Математические модели и методы расчета процессов, сопровождающих обледенение летательного аппарата // Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33, № 5. С. 237–248.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Кравченко М.Н.^{1,2}, Аминев Д.А.²

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

²РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

e-mail: dep.ngipg@yandex.ru

В связи со развитием вычислительных ресурсов, становится возможным переходить к изучению сложных физических явлений, в том числе с учетом мелкомасштабных процессов, происходящих в поровых коллекторах, насыщенных многофазными, многокомпонентными флюидами. Переход от методов классического численного моделирования дополняется возможностью использования нейросетевых технологий. Моделирование физических процессов, основано на математическом их описании системами дифференциальных уравнений как в обычных, так и в частных производных. Наличие фазовых переходов и химических взаимодействий фильтратов и пористой матрицы требует тонкой перенастройки модели с учетом нестационарности процессов. Например, в задаче фильтрации газа [1] в пористой среде необходимо учитывать, как прямые, так и обратные процессы диссоциации/гидратообразования, или проявление неньютоновских свойств фильтратов сред в задаче течения жидкости Бингама-Шведова в низкопроницаемом поровом коллекторе [2]. Решить аналитически нелинейные системы в большинстве подобных задач не представляется возможным, поэтому используются методы численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных такие, такие как метод конечных разностей или метод конечных объемов. К существенным недостаткам вышеуказанных методов относят: накопление ошибки при итерационном решении, проблема сходимости и устойчивости, в особенности для нелинейных уравнений.

В данной работе авторы сравнивают результаты решений вышеуказанных задач, полученных методом конечных разностей (реализация Fortran) и с помощью применения нейросетей, реализованных на языке программирования Python (Pytorch). В качестве теста для реализованных численных методов выступают задачи Баклея-Левверетта о двухфазной фильтрации жидкости в пористой среде [2] и распада произвольного разрыва (тест Сода).

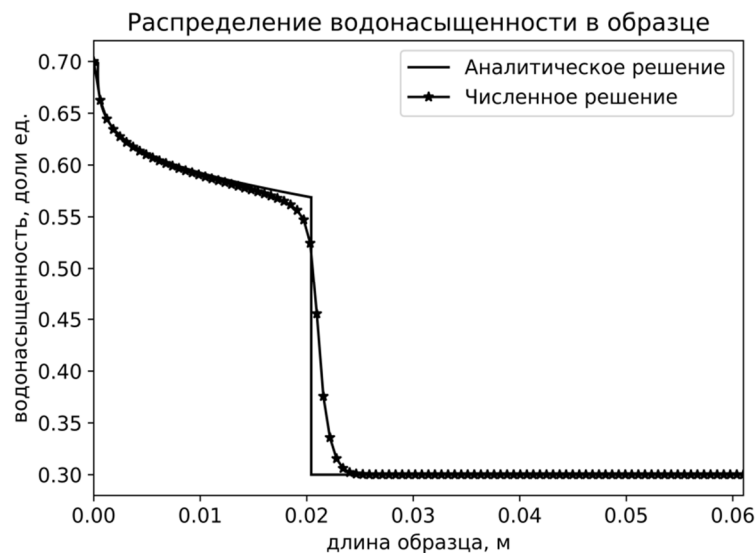


Рис.1 Сравнение аналитического и численного решений задачи Баклея-Левверетта.

1. Aminev D.A., Kravchenko M.N. Determining reservoir parameters with nonisothermal real gas flow // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. 1201. p. 1–5.
2. Aminev D.A., Badertdinova E.R., Kravchenko M.N. Updating reservoir properties for high-viscosity oil fields at the late stage of production // Problems of continuum mechanics. 2021. p. 252–257.
3. Buckley, S.E., M.C. Leverett. Mechanism of Fluid Displacement in Sands // Trans. 1942. 146. p.107 – 116.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НЕФТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

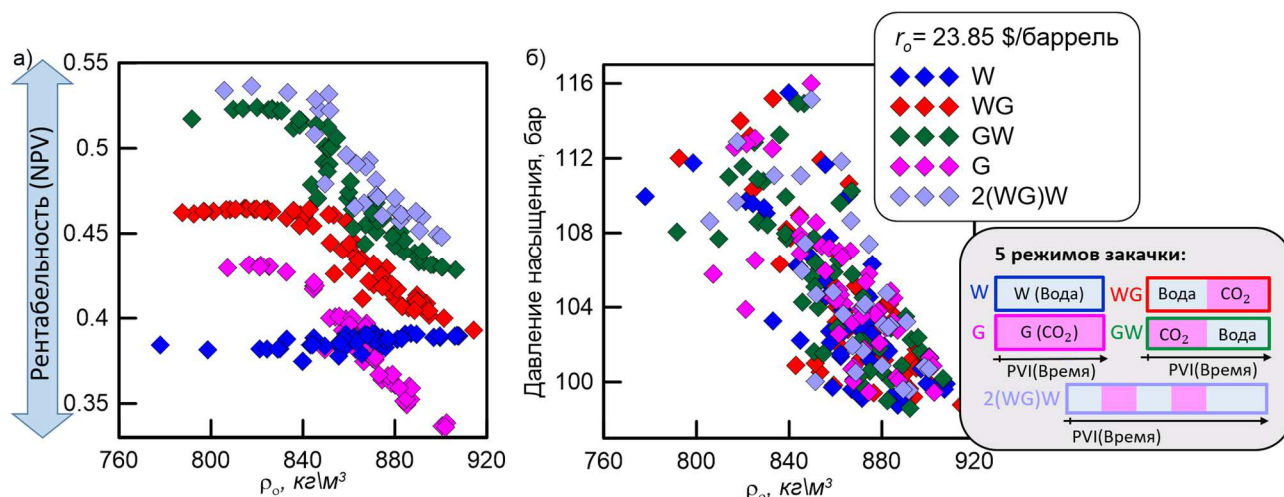
Андреева А.И., Афанасьев А.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: waandreeva@gmail.com

Для повышения нефтеотдачи пластов применяют различные методы, к примеру, закачивают воду и/или газ. 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). Помимо этого, CO_2 является парниковым газом, поэтому для решения проблемы глобального потепления актуально уменьшение его выбросов в атмосферу. Чтобы повысить нефтеотдачу нужно определить оптимальные режимы закачки воды и газа: в каком порядке закачивать воду и газ, какие объемы необходимо закачать.

В данной работе рассмотрено плоское течение в области, расположенной вдоль оси Ox , на краях которой расположены добывающая и нагнетательная скважины. Пористая среда насыщена нефтью с некоторым компонентным составом. При фиксированном составе нефти в статье [1] проведено исследование оптимальных режимов водогазового воздействия на нефтяные пласты с целью повышения нефтеотдачи и захоронения углекислого газа. Однако в зависимости от состава нефти оптимальные режимы водогазового воздействия могут быть различны. Цель исследования – определить зависимость между физическими характеристиками пластовой нефти и оптимальным режимом водогазового воздействия. Одной из таких характеристик является плотность. Различным составам нефти соответствуют свои значения плотности, поэтому проводилось исследование влияния плотности нефти на оптимальные режимы водогазового воздействия.



Зависимость рентабельности NPV (а) и давления насыщения (б) от плотности нефти (ρ_o). Различным точкам соответствуют различные составы нефти.

Также одной из характеристик пластовой нефти является давление насыщения. Это давление, при котором газ начинает выделяться из нефти. Давление насыщения зависит от компонентного состава нефти и пластовой температуры. Показано, что давление насыщения нельзя использовать для оценки оптимальности стратегий, так как нет локализации точек вдоль какой-либо кривой (рис. 1б). Следовательно, лучшей характеристикой различных составов нефти является ее плотность. Показано, что зависимость рентабельности от плотности нефти – убывающая функция для всех стратегий, в которых присутствует закачка газа (рис. 1а), а водогазовое воздействие эффективно применять на месторождениях легкой нефти.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №19-71-10051).

1. Afanasyev A.A., Andreeva A.I., Chernova A.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. T. 205. C. 108803 DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108803.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИКИ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА БИОСОВМЕСТИМЫХ ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА РЕЕК (ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОН)

Сметанников О.Ю., Анисимов А.А.

Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь

e-mail: Sou2009@mail.ru, lex.asterio@gmail.com

Алгоритм расчета разработан на языке ANSYS APDL с использованием технологии «оживления» и «умерщвления» элементов [1]. В качестве определяющих соотношений выбрана вязкоупругая модель Прони, а температурно-временной сдвиг описывается функцией Вильямса-Ландела-Ферри.

В качестве исследуемого материала выбран термопластичный полукристаллический полимер РЕЕК (Полиэфирэфиркетон), активно применяющийся в современных отраслях промышленности в силу уникального сочетания целого ряда эксплуатационных свойств: термо-, тепло- и огнестойкость, низкая гигроскопичность, радиационная и химическая стойкость, хорошие механические и диэлектрические свойства, биосовместимость.

Работа направлена на исследование тепловых деформаций и остаточных напряжений изделий, а также создание численной модели, которая позволит определять оптимальные условия печати для получения лучших свойств и геометрии конечного изделия.

Исследование охватывает: извлечение термомеханических свойств материала из данных сторонних источников и собственного ДМА эксперимента, адаптацию этих свойств к физическим моделям ANSYS, численное моделирование процесса производства с различной степенью дискретизации задачи и верификацию этой модели по результатам собственного эксперимента.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбранные физические модели подходят для описания материала. Результаты численного эксперимента близки к реальному, и продолжают сближаться с увеличением степени дискретизации задачи.

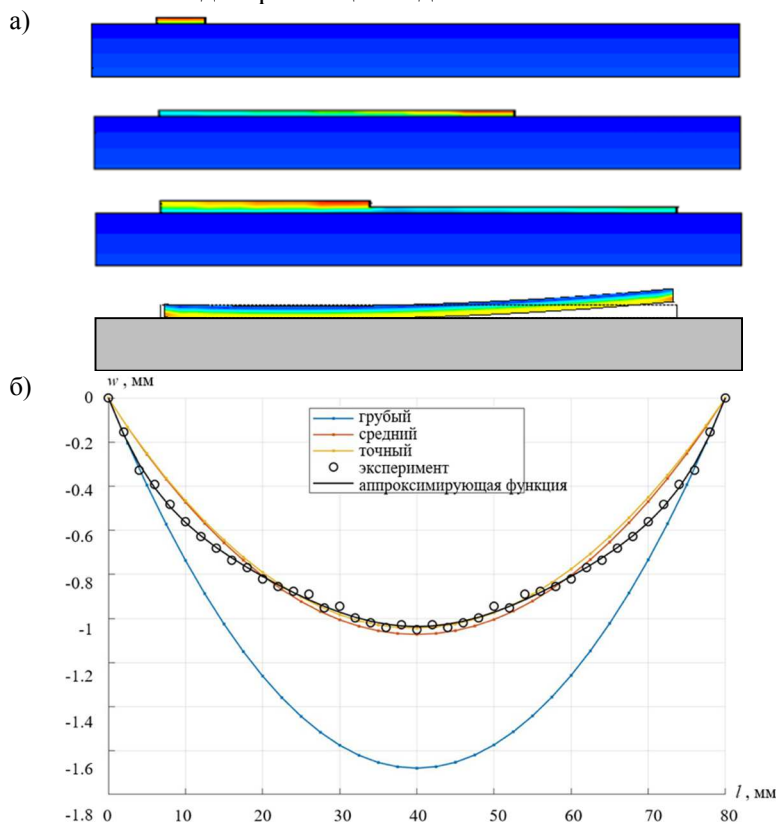


Рис. 1. Основные особенности исследования: а – численная реализация процесса наращивания образца с последующим отделением от основания, б – сравнение результатов численного и реального экспериментов.

1. Сметанников О.Ю., Максимов П.В., Трушников Д.Н., Пермяков Г.Л., Беленький В.Я., Фарберов А.С. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволоочных материалов на формирование остаточных деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. №2.

ПРОЦЕСС НАВОДОРАЖИВАНИЯ СКОМКАННОГО ГРАФЕНА РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ

Апкадилова Н.Г., Крылова К.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

e-mail: apkadirovanerkes@gmail.com

Интерес к исследованию скомканного графена (СГ) в качестве среды для хранения и транспортировки водорода связан с высокой скоростью адсорбции газов и с большой площадью удельной поверхности. Наилучшая сорбция атомов водорода СГ наблюдался при криогенных температурах. На процесс накопления водорода оказывает влияние не только температура, но также изменение структурных параметров, например, увеличение диаметра нанотрубки приводит к росту количества адсорбированного водорода [1]. Однако на данный момент недостаточно изучена зависимость сорбционной емкости от плотности СГ, помещенного в водородную среду. В связи с этим целью данной работы была оценка зависимости сорбционной емкости от плотности СГ.

Молекулярно-динамическое моделирование проводилось с помощью общедоступного и широко применяемого программного пакета LAMMPS и многочастичного потенциала Airebo [2].

Ячейка моделирования состоит из водородной среды, в центре которой расположен СГ. В процессе моделирования во всех трех направлениях задавались периодические граничные условия. Анализ количества абсорбированного водорода проводился с использованием собственных программных пакетов.

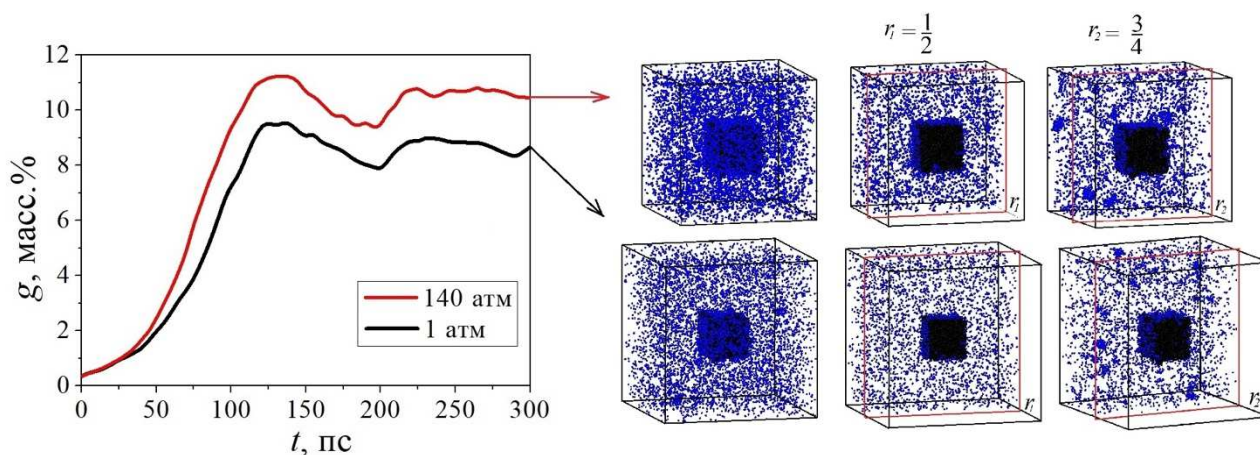


Рис. 1. Зависимость гравиметрической плотности СГ от времени и изображения структур при разных степенях сжатия.

СГ с плотностью $\rho = 2,07 \text{ г/см}^3$ выдерживали при температуре 77 и 300 К и давлении $p = 1$ и 140 атм. (рис. 1). Установлено, что при 77 К водород удерживается на поверхности СГ посредством сил Ван-дер-Ваальса, а при 300 К гравиметрическая плотность СГ растет за счет атомов водорода, образующих с краевыми атомами углерода ковалентную связь. При давлении 140 атм. некоторые атомы водорода проникают во внутренние поры и пустоты СГ. Наилучшая гравиметрическая плотность СГ наблюдается при 77 К и 140 атм. и составляет 10 масс.%. Уменьшение плотности СГ приводит к увеличению количества атомов водорода, вошедших в структуру.

Работа Апкадировой Н.Г. выполнена в рамках государственного задания молодежной лаборатории ИПСМ РАН, работа Крыловой К.А. выполнена в рамках гранта РНФ №. 20-72-10112.

1. Apkadirova N.G., Krylova K.A. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1008, 012051.

2. Stuart S. J., Tutein A. B., Harrison J. A. // J. Chem. Phys. 2000. Vol. 112, № 14. P. 6472.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ ТИТАНА

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

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

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

Использование металлических микрочастиц в качестве горючего подразумевает их превращение в продукты горения и может осуществляться как с целью выделения энергии, так и для получения оксидных частиц в качестве целевого продукта. Очевидно, что для оптимизации процессов в технических устройствах, реализующих превращение металла в оксид, необходимо уметь рассчитывать движение именно горящих частиц в газообразной среде. Исходя из этого, целью работы было исследование закономерностей движения горящих частиц в свободном падении в воздухе и определение эффективного коэффициента аэродинамического сопротивления горящих частиц титана.

В ходе экспериментов [1] получен массив данных из более чем 100 траекторий движения горящих частиц титана различных диаметров порядка сотен микрометров в свободном падении в воздухе. Под траекторией подразумевается эмпирическая зависимость $x(t)$ координаты частицы x от времени t . Зависимости получены посредством видеосъемки падения горящих частиц со скоростью 25 или 500 кадров секунду. Разработана математическая процедура осреднения траекторий и для ряда интервалов размеров частиц построены обобщенные полиномиальные зависимости координаты частицы $x(t)$ и ее скорости $v(t)$ от времени t до момента начала фрагментации, рис. 1.

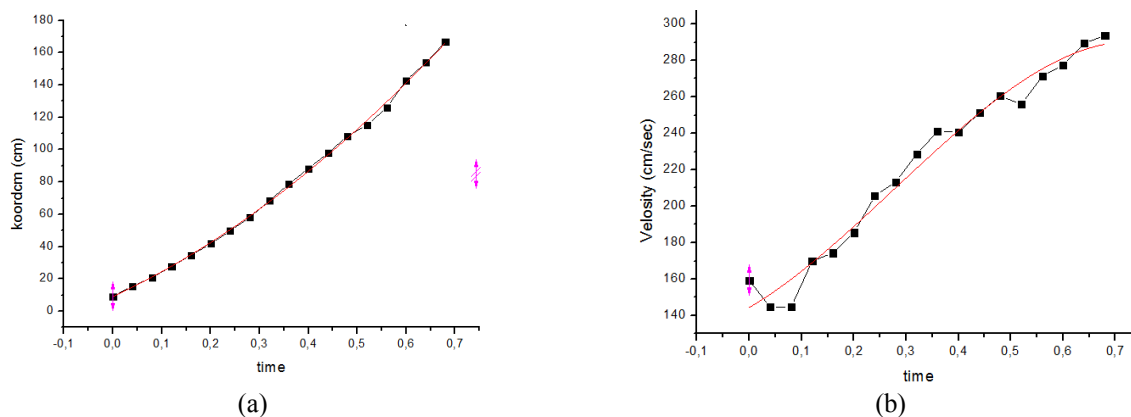


Рис. 1. Полиномиальная зависимость координаты частицы $x(t)$ (а) и скорости $v(t)$ (б) от времени.

Определен эффективный коэффициент аэродинамического сопротивления горящих частиц титана в форме $C_d = A/Re$, где Re – число Рейнольдса. Установлено, что для частиц исследованного диапазона размеров величина параметра A не зависит от диаметра частицы и составляет 65–68, что примерно втрое выше, чем в Стоксовском выражении $C_d = 24/Re$. Полученные результаты позволяют рассчитывать движение частиц с использованием известного аналитического решения задачи о движении сферической частицы под действием сил тяжести и Стокса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект №20-33-90208.

1. Глотов О.Г., Белоусова Н.С., Сурудин Г.С. «Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. I. Экспериментальные методики, время горения и режимы фрагментации», ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА Том: 57 Номер: 6 Страницы: 20-31 DOI:10.15372/FGV20210603.

УЛУЧШЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ РУ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

Бесчеров Д.Е., Ереев М.Н., Куликов Д.А., Маслов М.Г., Порфирьев М.С., Савчук Д.В.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: bescherov@okbm.nnov.ru

К современным центробежным насосам реакторных установок предъявляются требования по низкому уровню вибрации и шума.

Наиболее важным следствием воздействия вибрации на насос является накопление повреждений при циклическом изменении нагрузки. Этот процесс приводит к образованию и распространению трещин, которые в конечном итоге разрушают конструкцию.

Виброактивность центробежного насоса определяется тремя факторами: конструкцией, технологией изготовления и условиями эксплуатации. Все факторы взаимосвязаны между собой.

Задача исследования вибрационных характеристик центробежных насосов актуальна для современных реакторных установок и требует комплекс связанных расчетов гидродинамики и вибрации. Методы расчетного компьютерного моделирования на основе современных программных средств и суперЭВМ позволяют проводить такие исследования, которые в дальнейшем подтверждаются испытаниями на стендах.

В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается центробежный насос, обеспечивающий выбранные гидравлические характеристики:

- расход $Q = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- напор $H = 30 \text{ м}$.

Обеспечение требующихся вибрационных характеристик центробежного насоса проводится в результате расчетного исследования методами компьютерного моделирования.

Расчетное исследование включает в себя решение следующих задач:

- определение основных источников вибрации насоса;
- разработка концепции расчетного моделирования роторной системы и корпуса насоса;
- адаптация программного и аппаратного обеспечения;
- определение влияния варианта проточной части и возникающих гидродинамических сил на вибрационные характеристики насоса;
- определение вибрации, передаваемой на корпус насоса в результате вращения ротора;
- анализ результатов исследования.

Анализ влияния варианта проточной части на вибрационные характеристики насоса проводится по методике, прошедшей верификацию в АО «ОКБМ Африкантов» на насосе прототипе. Методика позволяет получать, с использованием метода конечного элемента, расчетные результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными.

При расчетном исследовании рассматриваются варианты проточной части насоса с выбранными гидравлическими характеристиками. Для каждого варианта используются конечно-элементные модели корпуса насоса (рисунок 1), по которым проводятся гидродинамические и вибрационные расчеты.

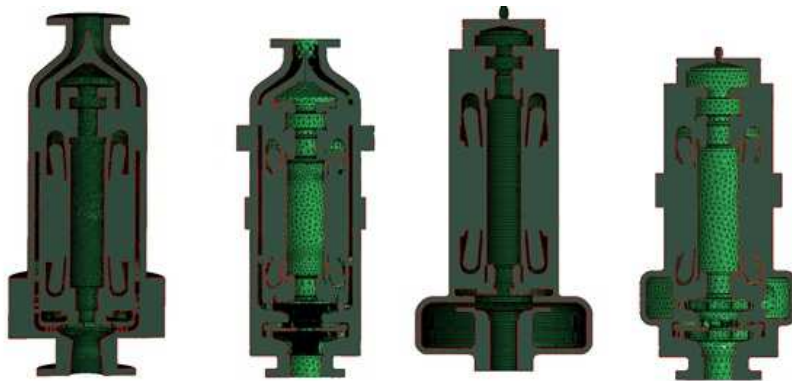


Рисунок 1. Рассмотренные варианты конструкции насоса.

По результатам расчетного исследования определено, что полнопроточная одноступенчатая конструкция насоса обладает лучшими вибрационными характеристиками, чем прототип и может быть рекомендована для реакторной установки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА TiNi, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Бикбаев Р.М.¹, Palani I.A.², Реснина Н.Н.¹, Беляев С.П.¹, Mani Prabu S. S.², Manikandan M.²,
Jayachandran S. ², Anshu Sahu²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Discipline of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Indore, Indore, INDIA

e-mail: BikbaevRM@yandex.ru

Материалы с эффектом памяти формы широко используются в разных отраслях промышленности, благодаря своим уникальным свойствам восстанавливать форму при нагревании или разгрузке. Однако, из-за сложности обработки резанием, создание деталей сложной формы является крайне затруднительным. В связи с этим, все большее внимание привлекают аддитивные технологии. Среди многочисленных методов можно выделить технологию WAAM (wire-arc additive manufacturing) – метод послойного наплавления сплава. Ранее было показано, что структура образцов сплава TiNi, полученных методом WAAM, неоднородна по химическому составу, что оказывает влияние на мартенситные превращения, которые в каждом слое реализуются при различных температурах. Вместе с тем, параметры мартенситных превращений определяют функциональные и механические свойства таких образцов. Целью настоящей работы явилось исследование механических и функциональных свойств пятислойного образца сплава TiNi, полученного методом послойной наплавки, и моделирование его функционального поведения с использованием программного пакета ANSYS.

В эксперименте использовали пятислойные образцы из сплава TiNi синтезированные на титановую подложку методом электродуговой послойной наплавки, в котором в качестве расходного электрода выступала проволока сплава Ti_{49,1}Ni_{50,9} диаметром 1,2 мм. Из полученного образца вырезали пластины толщиной 0,5 мм из которых изготавливали образцы, ширина и длина рабочей части которых составляла 1 и 10 мм, как показано на рис. 1. Образцы подвергали термообработке при температуре 450°C в течении 10 часов. В образцах исследовали псевдоупругое поведение и восстановление деформации при нагревании после предварительной деформации в мартенситной фазе.

Полученные результаты показали, что образцы из сплава TiNi синтезированные методом послойной электродуговой наплавки демонстрируют такие функциональные свойства как память формы, обратимая память формы, псевдоупругость.. В образцах, в рабочую часть которых входили слои с избытком Ti и Ni восстановление деформации происходит в несколько хорошо различимых стадий. Если в рабочую часть входил слой с избытком Ti эффект псевдоупругости был подавлен, а если были слои только с избытком Ni, то наблюдалась совершенная псевдоупругость. Максимальная восстанавливаемая деформация была в 2-2,5 раза меньше, чем в образцах сплава TiNi полученных традиционным способом, что связано с сильной кристаллографической текстурой. Данные экспериментов использовали для моделирования одноосного растяжения слоистых образцов методом конечных элементов в программной системе ANSYS Mechanical. Расчетные данные качественно совпадают с экспериментальными.



Рис. 1. Образец на растяжение, вырезанный из 5-ти слойной стенки, полученный методом послойной электродуговой наплавки и способ его закрепления в стандартных захватах испытательной машины.

СТРУКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

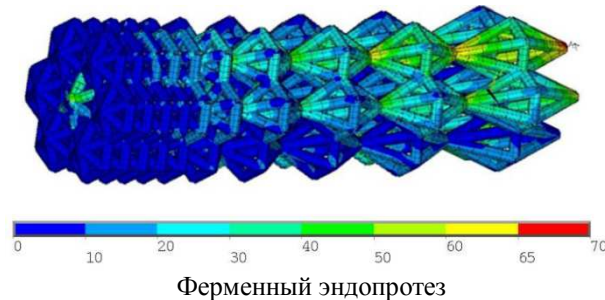
Большаков П.В.^{1,2}, Харин Н.В.¹, Акифьев К.Н.¹, Саченков О.А.^{1,2}

¹Казанский федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань

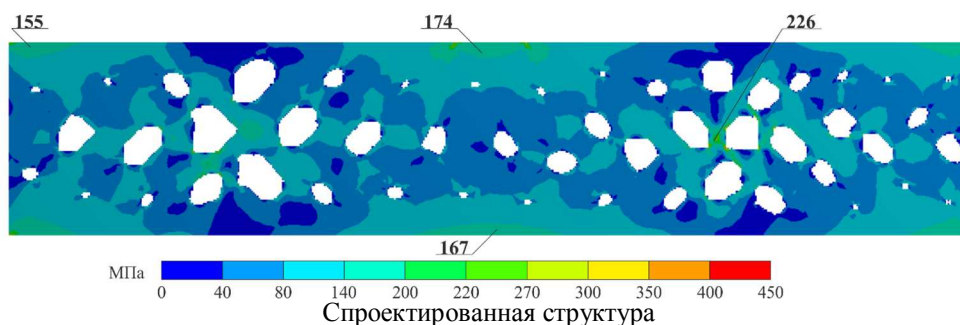
e-mail: bolshakov-pavel@inbox.ru

Аддитивные технологии находят все большее распространение в производстве различных конструкций. Такой технологический подход позволяет проектировать структуру самого изделия адаптивной к внешним силовым воздействиям. Авторами был обобщён разработанный подход к проектированию ферменного эндопротеза [1, 2], который представлен в работе.



Конструкция рассматривается как композиция некоторых элементарных ячеек, обладающих микроархитектурой. Микроархитектура описывается некоторым вектором параметров. На основе численных экспериментов вектор параметров микроархитектуры ставится в соответствие физико-механическим свойствам. На основе этой функциональной зависимости может быть определена управляющая, инициализирующая вектор-функция. Таким образом, варьируя вектор параметров варьируются и физико-механические свойства элементарной ячейки и изделия в целом.

Был сформулирован итерационный процесс структурного проектирования конструкции, в рамках которого использована гипотеза соосности тензора напряжений и осей ортотропии базового элемента. Выходными данными являются векторно-скалярные поля параметров, на основании которых происходит реконструкция геометрии, вплоть до готовых к производству stl-файлов. Предлагаемый подход был реализован для пористого базового элемента с выраженной эллиптичностью в одном направлении. В качестве модельной задачи была рассмотрена балка, работающая на трехточечный изгиб.



Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, грант № 0671-2020-0059.

1. Большаков П.В., Кашапова Р.М., Саченков О.А. О проектировании ферменного эндопротеза // Современные проблемы теории машин. – 2017. – № 5. – С. 42 – 44.

2. Bolshakov P., Raginov I., Egorov V., Kashapova R., Kashapov R., Baltina T., Sachenkov O. Design and optimization lattice endoprosthesis for long bones: Manufacturing and clinical experiment//Materials. – 2020. – Vol.13, Is.5.

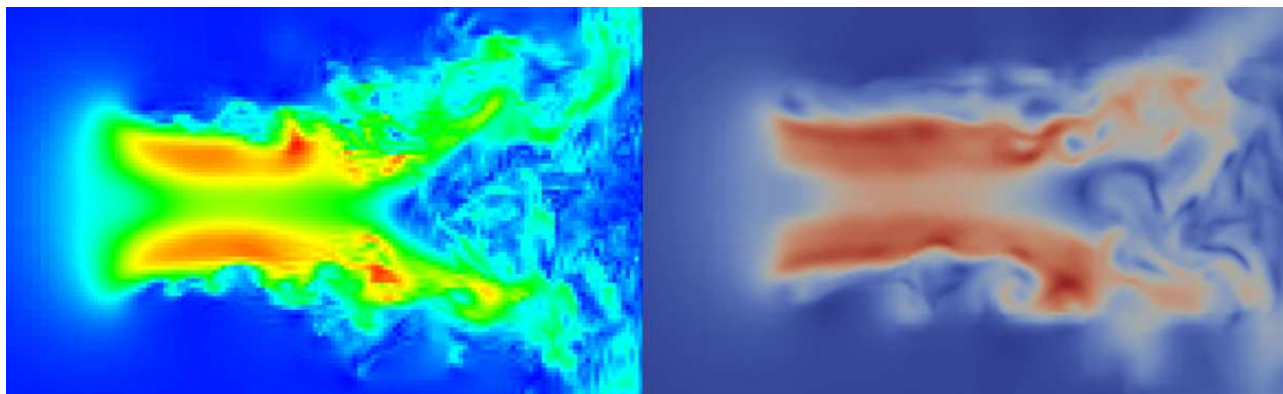
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГРЕБНОГО ВИНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТОВ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ

Бритов А.Д., Ярикова С.П., Елистратов С.А., Епихин А.С., Сибгатуллин И.Н.

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

e-mail: britovad@ispras.ru, yarikova_sp@ispras.ru

В работе выполнена оценка и анализ вычислительных затрат, и точности различных инструментов численного моделирования гидродинамических полей вблизи лопастей гребного винта: метод конечного объема на статической сетке с прямым разрешением поверхности лопастей и с заменой воздействия лопастей на распределенную переменную силу [1] (пакет OpenFOAM [2]); метод конечного объема на динамически адаптируемой сетке с заменой воздействия лопастей на распределенную переменную силу (пакет AMReX [3]); метод спектральных элементов на статической сетке с заменой воздействия лопастей на распределенную переменную силу (пакет Nek5000 [4]). Ниже представлены поле скорости, полученное по одной из моделей, а также сравнение влияния параметров модели на качество моделирования гребного винта в следе. Сравнение производилось для одинаковой геометрии и условий, данные численного моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными.



Мгновенные поля скорости при моделировании гребного винта Ка4-70 в пакетах AMReX и OpenFOAM.

Результаты сопоставления позволили оценить на практическом примере сильные и слабые стороны рассмотренных вычислительных алгоритмов для их дальнейшей интеграции с различными моделями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-57-53019.

1. Yang, X., Sotiropoulos, F., 2018. A new class of actuator surface models for wind 1017 turbines. *Wind Energy* 21 (5), 285–302.
2. OpenFOAM platform, <https://www.openfoam.com/>
3. AMReX software, <https://github.com/AMReX-Codes/amrex>
4. Nek5000 open code, <https://nek5000.mcs.anl.gov/>

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Буковский П.О.^{1,2}, Муравьева Т.И.¹, Щербакова О.О.¹, Шкалей И.В.¹

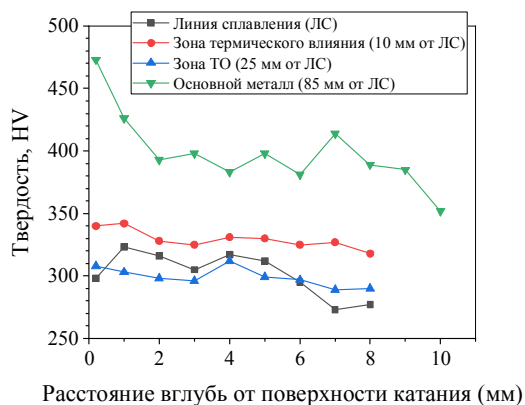
¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

²НТУ «Сириус», Сочи

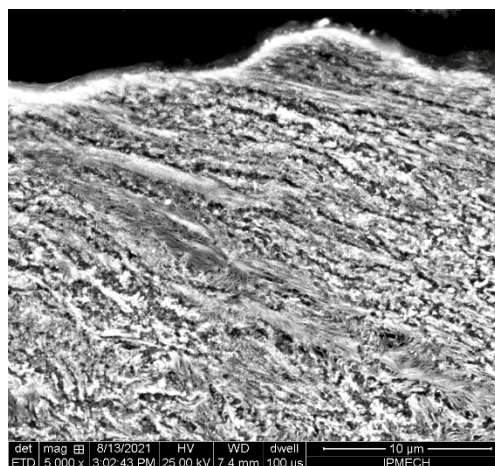
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

В данной работе были изучены контактно-усталостные повреждения в приповерхностных слоях головки рельса в области сварного стыка на основе экспериментальных данных о механических свойствах и изменении структуры рельсовой стали в процессе эксплуатации. Объектами исследования служили образцы, изготовленные из рельсовой стали категории ДТ350 общего назначения: исходный (без наработанного тоннажа) и после эксплуатации при различных условиях. Образцы отличались значениями пропущенного тоннажа с момента первичной укладки до изъятия. Поверхностные слои рельсов в зоне сварных стыков были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Quanta 650. Микротвердость измеряли на твердомере Shimadzu HNMV-2000 при вдавливании алмазной четырехгранной пирамиды Виккерса.

Известно [1], что в зоне сварных стыков эта сталь имеет локальное понижение твердости, обусловленное процессом сварки и термической обработкой после нее. Поэтому были проведены исследования образцов у поверхности катания в различных зонах: непосредственно линия сплавления, зона термического влияния (ЗТВ) при сварке, зона термической обработки (ТО) и зона основного металла. В качестве примера приведены результаты, полученные для образца из рельсовой стали, пропущенный тоннаж которого составлял 442,2 млн. т. брутто. На рис. 1а представлены полученные результаты по измерению твердости. Среднее отклонение от фактического значения составляет 5–10%. На рис. 1б дано СЭМ - изображение микроструктуры на расстоянии 10 мм вглубь от поверхности катания.



а)



б)

Рис.1. Исследования образца рельсовой стали после эксплуатации:

- а) зависимость твердости от расстояния вглубь от поверхности катания в различных зонах сварного стыка;
б) СЭМ-изображение среза у поверхности катания.

Установлено, что структурные особенности определяют механические свойства материала в зоне сварного стыка, в частности, зафиксирована зависимость твердости от расстояния до линии сплавления. Показано, что в зоне стыка, вследствие пониженной твердости, в результате воздействия колес происходит пластическое смятие с образованием деформированного слоя, которому свойственны различные стадии деформации и разрушения материала.

Исследование выполнено по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4) и частично при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51005.

1. Шур Е.А., Федин В.М., Борц А.И., Ронжина Ю.В., Фимкин А.И. Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. №4. С. 210-217.

БИОДЕГРАДАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРИРОДНОЙ ДОБАВКИ

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

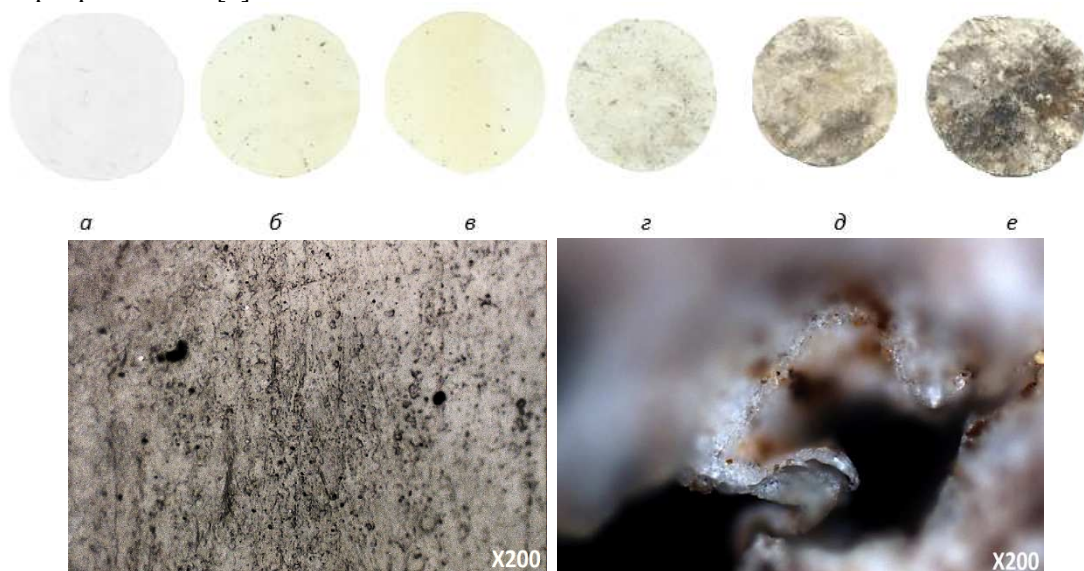
¹Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

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

e-mail: ivetta.varyan@yandex.ru

Биодеградируемые полимеры (англ. biodegradable polymers) или биоразлагаемые полимеры – это материалы с регулируемым сроком эксплуатации, полимеры, самопроизвольно разрушающиеся в результате естественных микробиологических и химических процессов [1].

Термином «биоразлагаемый» принято именовать полимер, деструкция или ухудшение прежних качеств которого могут быть вызваны хотя бы частично биологической системой [2]. Как правило, биодеструкция полимера инициируется не биологическими процессами, а поглощением полимером тепла или света, механическими повреждениями, химическими реакциями, диффузией компонентов среды в материал и т.п., что в конечном итоге может приводить к деградации материала и усиленной атаке микроорганизмов [3].



В данной работе были исследованы полимерные композиты на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) с различным содержанием (0-15 мас.%) натурального каучука (НК) с целью создания нового биоразлагаемого материала с ускоренным биоразложением в почвенном грунте. Способность полимеров разлагаться и усваиваться микроорганизмами зависит от ряда их характеристик. Наиболее важными являются химическая природа полимера, молекулярная масса, структура его молекул, разветвленность макроцепи (наличие и природа боковых групп), надмолекулярная структура [4].

Визуально и с помощью оптического микроскопа (рисунок) наблюдали изменения внешнего вида образцов после экспонирования в почве: появление окрашенных участков разной степени интенсивности, изменение рельефных характеристик и целостности (наличие полостей и сквозных отверстий) пленок. Для композиций с содержанием НК 40 и 50 масс% эти изменения проявляются в наибольшей степени.

1. Shalaby W. Shalaby, Karen J.L. Burg [editors] Absorbable and biodegradable polymers (Advances in Polymeric Biomaterials) ISBN 0-8493-1484-4.

2. Пехташева Е.Л., Неверов А.Н., Заиков Г.Е., Стоянов О.В. Биодеструкция и биоповреждения материалов. Кто за это в ответе? // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 8. С. 222-233.

3. Сакаева Э.Х., Мехоношина А.В. Исследование биодеструкции отходов полимерных материалов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 1. С.97-105.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

Вершинина Ю.В., Прохоров С.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: SmorchkovaYV@mpei.ru

В последнее время все более актуальной становится проблема повышения энергоэффективности и безопасности ядерных энергетических установок. Одним из путей решения этой проблемы является использование тепловыделяющих сборок с микротвэлами (ТВС МТ) [1]. Конструкция ТВС МТ была предложена в работе [1]. В такой сборке микротвэлы размещаются между перфорированными чехлами в виде свободной засыпки и непосредственно охлаждаются однофазным или двухфазным теплоносителем. Такие тепловыделяющие сборки могут быть использованы в атомных станциях малой мощности, т.к. обладают надежной радиационной безопасностью в случае возникновения аварий. Одна из трудностей, возникающая при внедрении микротвэлов в ядерные энергетические установки, состоит в недостаточной изученности теплогидравлических характеристик в засыпках из шаров с внутренним тепловыделением. Настоящая работа является продолжением ранее начатых исследований [2].

Для экспериментального исследования в работе создан экспериментальный стенд (рис. 1а), который включает в себя гидравлический контур, систему измерения, сбора и обработки информации, рабочий участок с шаровой засыпкой, систему высокочастотного индукционного нагрева для обеспечения тепловыделения в шаровой засыпке. Стенд рассчитан на следующие режимные параметры: температура теплоносителя до 100°C, давление теплоносителя до 1,5 МПа, расход теплоносителя (0,01–0,50) кг/с, мощность индукционного нагрева до 20 кВт. В качестве теплоносителя будут использоваться дистиллированная вода и хладоны.

Рабочий участок с шаровой засыпкой состоит из двух коаксиально расположенных трубок. Шарики диаметром 2,0 мм размещаются во внутренней трубке между перфорированными решетками. Наружная трубка расположена между фланцами и обеспечивает прочность и герметичность конструкции.

Первые экспериментальные данные получены на экспериментальном стенде при течении однофазного теплоносителя – дистиллированной воды для шаровой засыпки высотой 50 мм. Пористость засыпки составила 0,383. Экспериментальные данные представлены на рис. 1б) в виде зависимости потерь давления от массового расхода теплоносителя.

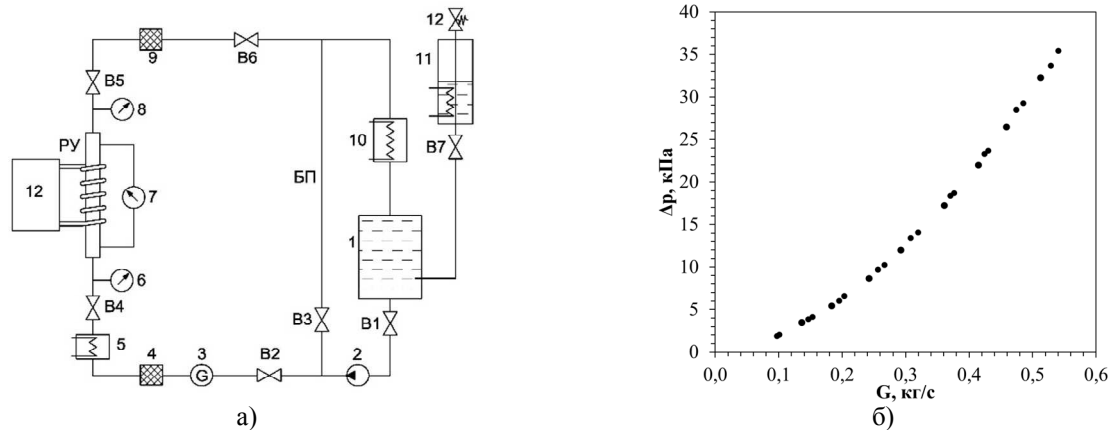


Рис. 1 а) Схема экспериментального стенда. 1 – бак; 2 – центробежный насос; 3 – расходомер; 4,9 – сетчатые фильтры; 5 – предварительный нагреватель; 6, 8 – датчики давления; 7 – датчик перепада давления; 10 – теплообменник; 11 – термокомпрессор; РУ – рабочий участок с шаровой засыпкой; 12 – предохранительный клапан; В1 – В7 – вентили.

б) Зависимость потерь давления от массового расхода теплоносителя.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4552.2022.4.

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., Дегальцев Ю.Г. и др. Перспективы применения микротвэлов в ВВЭР // Атомная энергия, Т.86, №6, 1999. – С. 443-449.

2. Smorchkova Yu.V., Varava A.N., Dedov A.V., Zakharenkov A.V., Komov A.T. The experimental determination of the coefficient of hydraulic resistance of a perforated plate with a layer of balls adjoining to it // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Volume 891, Paper number 012038.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ФИКСАЦИИ ЗАДАННОЙ ПОЗИЦИИ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ И РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ С ТРОСОВЫМ ПРИВОДОМ

Ветлицын М.Ю., Шаронов Н.Г.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград
e-mail: mikhail.vetlitsyn@mail.ru

Выполнение различных операций в машиностроении связано с многократным повторением определённых движений, производимых различными устройствами. Точное и стабильное позиционирование «захвата» и изменение геометрии реконфигурируемых конструкций не только влияет на качество и скорость выполнения технологической операции, но и определяет возможность применения роботизированного устройства [1]. Обеспечение требуемой точности и стабильности позиционирования формируется в устройстве на этапе конструирования и изготовления применением оптимальных конструкторских решений и построением системы управления, обеспечивающей заданную точность. Отсутствие возможности учета всех факторов, влияющих на точность и стабильность выполнения реконфигураций и закрепления изделия в «захвате», требует выполнения тестирования работы устройства с расчётом математических критериев, оценивающих надёжность применения устройства и показывающих направления для конструкционной доработки.

Испытания макета мехатронного узла с тросовым приводом и цифровой системой управления выполнено для определения возможности применения подобной конструкции в качестве нервюры крыла БПЛА и синтеза «пальце подобного» захватного приспособления, как показано на рисунке. Тестирование выполнено посредством многократного исполнения задания на «заданное отклонение», получаемого системой управления и фиксируемого исследователем. Полученные результаты позволили выполнить разносторонний анализ точности и стабильности выполнения задания, сформировать вероятностные критерии работы устройства в различных режимах эксплуатации [2]. Для составления и накопления сравнительной количественной информации по оценке работы реконфигурируемых конструкций анализ производился методами «комбинаторики», определением различных статистических характеристик, прогнозированием вероятности выполнения реконфигураций с «недопустимой точностью», определением «доверительного интервала».

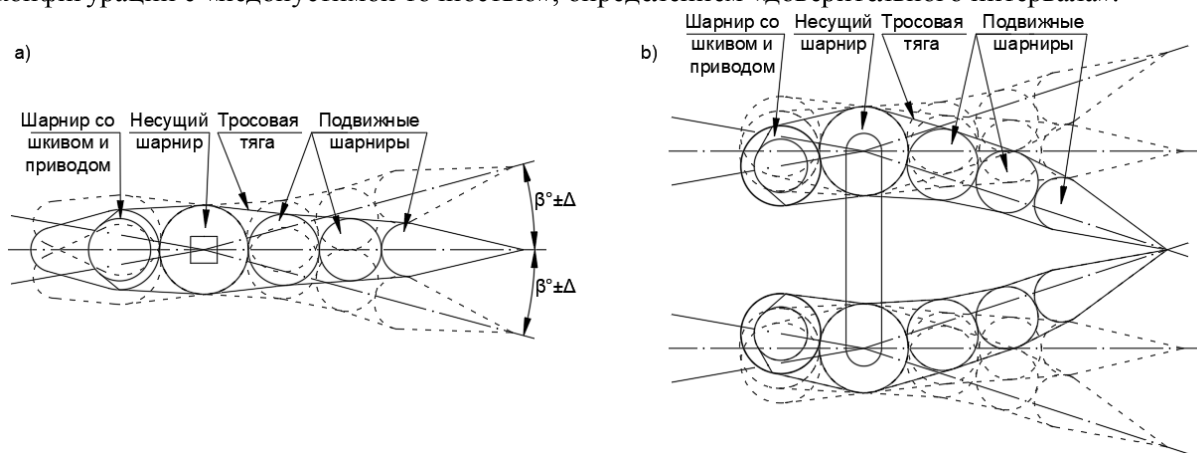


Рис. Объекты исследования: (а) – мехатронный узел адаптивного крыла, (б) – мехатронный узел адаптивного захвата.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01589.

1. Ветлицын, М. Ю. Оценка стабильности работы мехатронного узла нервюры БПЛА с цифровой системой управления / М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын, А. В. Малолетов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 1(260). – С. 53-56. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-1-260-53-56. – EDN RCFYVL.

2. Оценка точности системы управления макета нервюры адаптивного крыла / М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын, Г. Ю. Прокудин, Н. Г. Шаронов // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021): Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 379-386. – EDN CCPENZ.

РАВНОВЕСИЕ СФЕРИЧЕСКОГО НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ТЕЛА В КАПЛЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Согомонян К.Л.¹, Шарова О.А.^{1,2}, Виноградова А.С.², Пелевина Д.А.^{1,2}

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

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

e-mail: vinogradova-as@mail.ru

В данной работе экспериментально и теоретически изучается равновесие сферического намагничивающегося тела в капле магнитной жидкости (МЖ) на горизонтальной плоскости в однородном горизонтальном магнитном поле. В эксперименте такое поле создается катушками Гельмгольца или с помощью электромагнита ФЛ-1. Капля МЖ помещается на горизонтальное дно прямоугольного сосуда из оргстекла, заполненного некоторой немагнитной жидкостью, или на горизонтально расположенную подложку из оргстекла в воздухе. Сферическое тело из намагничивающегося материала погружается в каплю МЖ при включении некоторого начального магнитного поля. Затем фото- или видеосъемка проводится при ступенчатом увеличении поля до максимально возможного значения и дальнейшем ступенчатом уменьшении поля до нуля. Так, для шаров разных размеров и материалов проведены серии экспериментов с разными объемами МЖ (на основе различных жидкостей-носителей) в различных окружающих немагнитных средах.

Равновесие сферического намагничивающегося тела в капле МЖ на горизонтальной плоскости в однородном горизонтальном магнитном поле также исследуется теоретически в безындукционном приближении, без учета сил поверхностного натяжения. Форма поверхности МЖ определяется из уравнения равновесия тяжелой, несжимаемой, однородной, изотермической МЖ и динамического граничного условия. Найдено аналитическое выражение для силы, действующей на тело со стороны окружающих сред. Высота плавления тела и объем МЖ рассчитываются численно таким образом, чтобы выполнялось уравнение равновесия тела. Получены зависимости высоты плавления тела от объема МЖ и величины поля для экспериментальных параметров. Показано, что при фиксированном магнитном поле существует минимальный объем МЖ, при котором тело может плавать, и максимальный объем МЖ, при котором расчетная форма поверхности МЖ перестает быть похожей на форму капли и МЖ полностью заполняет сосуд. Также показано, что при фиксированном объеме МЖ существует минимальная величина поля, необходимая для плавления тела.



Рис. Наблюдаемая в эксперименте и численно рассчитанная (зеленая линия) форма поверхности капли МЖ объемом 0,08 мл (на водной основе, плотностью 1,2 г/см³, магнитной проницаемостью 1,42), окруженной трансформаторным маслом (плотностью 0,93 г/см³), около шара из намагничивающегося эластомера (радиусом 0,215 см, массой 0,15 г, магнитной проницаемостью 3,62) в однородном горизонтальном магнитном поле $H = 450$ Э.

Численное моделирование показывает, что в отличие от вертикального поля [1], в котором шар может плавать на высоте нескольких миллиметров в малых объемах МЖ и в слабых полях, в горизонтальном поле тело может плавать только на высоте несколько десятых долей миллиметра, и это происходит только при относительно больших объемах МЖ и в достаточно сильных полях. Такая разница в высоте плавления шара может быть обусловлена положением МЖ: в горизонтальном поле МЖ располагается не под телом (как в вертикальном поле), а слева и справа от него.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 20-71-10002).

1. Pelevina D.A., Sharova O.A., Merkulov D.I., Turkov V.A., Naletova V.A. Spherical magnetizable body partially immersed in a magnetic fluid in a uniform magnetic field // JMMM. 2020. Vol. 494. P. 165751.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ШАРА В КАПЛЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В ОДНОРОДНОМ НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Согомонян К.Л.¹, Шарова О.А.^{1,2}, Виноградова А.С.², Пелевина Д.А.^{1,2}

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

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

e-mail: vinogradova-as@mail.ru

В [1] теоретически и экспериментально было показано, что сферическое намагничивающееся тело может плавать в капле магнитной жидкости (МЖ) на горизонтальной плоскости в однородном вертикальном магнитном поле. В данной же работе экспериментально изучается равновесие намагничивающегося шара в капле МЖ на горизонтальной плоскости в однородном наклонном магнитном поле. В эксперименте такое поле создается двумя парами катушек Гельмгольца. Величина поля фиксируется, а угол между направлением приложенного магнитного поля и вертикалью меняется в диапазоне от 0° (вертикальное) до 90° (горизонтальное). Используются МЖ на основе различных жидкостей-носителей. В качестве намагничивающегося сферического тела берутся либо шары из изотропного намагничивающегося эластомера на силиконовой основе с микрочастицами магнетита, либо шары из подшипниковой стали. Эксперимент проводится в различных окружающих немагнитных средах.

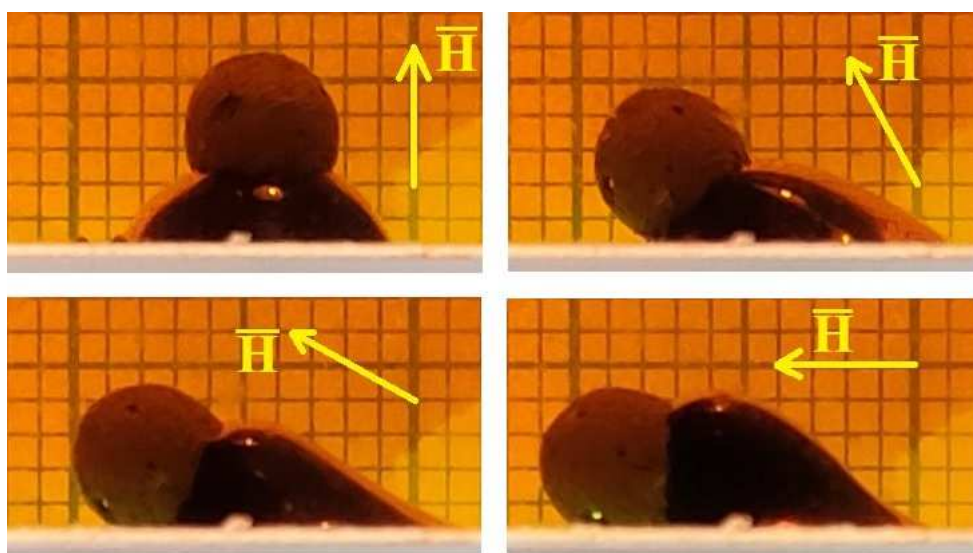


Рис. Равновесие шара из намагничивающегося эластомера (радиусом 0,215 см, массой 0,15 г, магнитной проницаемостью 3,62) в капле МЖ объемом 0,06 мл (на водной основе, плотностью 1,2 г/см³, магнитной проницаемостью 1,42), окруженной трансформаторным маслом (плотностью 0,93 г/см³) в однородном наклонном магнитном поле $H = 450$ Э в эксперименте типа 1.

Прямоугольная кювета, заполненная немагнитной средой, размещается в центре катушек Гельмгольца. На дно кюветы с помощью шприца или механического дозатора помещается заданный объем МЖ. Затем включается магнитное поле, и в каплю МЖ кладется намагничивающийся шар. Выполняется два типа эксперимента: 1) сначала включается вертикальное поле, затем угол ступенчато меняется до получения горизонтального поля; 2) сначала включается горизонтальное поле, затем угол ступенчато меняется до получения вертикального поля. Формы поверхности МЖ вокруг шара фиксируются фотосъемкой. Показано, что в вертикальном и наклонном магнитном поле (при некотором диапазоне углов наклона) шар может плавать, а в эксперименте типа 2 он плавает даже с дополнительным объемом МЖ, расположенным сверху от шара.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-71-10002).

1. Pelevina D.A., Sharova O.A., Merkulov D.I., Turkov V.A., Naletova V.A. Spherical magnetizable body partially immersed in a magnetic fluid in a uniform magnetic field // JMMM. 2020. Vol. 494. P. 165751.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В НАКЛОННОМ СЛОЕ

Володин И.В.^{1,2}, Алабужев А.А.^{1,2}

¹Пермский Государственный Национальный Исследовательский Университет, Пермь

²УРО РАН Институт Механики Сплошных Сред, Пермь

e-mail: ivanwolodin@gmail.com

Течения в слоях жидкости и тонких пленках на подложке привлекают большое внимание как с теоретической, так и с прикладной точки зрения [1]. Возможности нахождения аналитических решений гидродинамических систем, в особенности турбулентных с большим числом Рейнольдса (Re), часто ограничены, поэтому в этой сфере существует огромное количество разнообразных численных подходов [2]. Основное внимание в таких задачах уделяется изучению влияния диссипации. Информацию о влиянии вязкости можно получить при изучении среднего профиля скорости: точки перегиба которого будут определять разные области течения [3,4].

В данной работе рассматривается наклонная трехмерная полость с развитым турбулентным течением в поле тяжести. Граничные условия на боковых стенках периодические, на нижней границе – условия прилипания, на верхней свободной недеформируемой границе – условие непротекания и отсутствие касательных напряжений.

Задача решалась численно, на сетке до $1000 \times 1000 \times 500$ узлов с адаптивным шагом по вертикальной координате при помощи MAC-метода на разнесенной сетке при $Re \sim 10-10000$ [3, 4]. Описание метода можно найти в работах [5, 6]. Программный код был написан на языке C++.

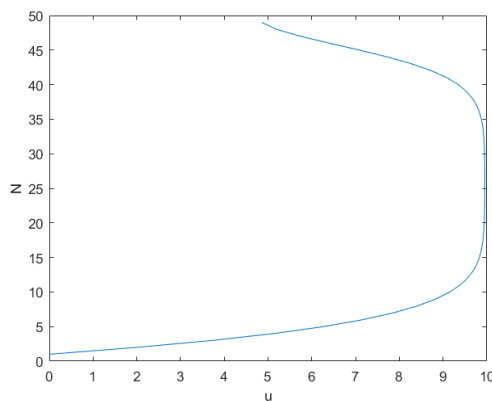


Рис. Профиль горизонтальной компоненты скорости ($Re=1000$).

Выбор именно таких размеров для вычислительной области продиктован наличием вязкого слоя Стокса $l \sim Re^{-1/2}$ и, соответственно, для разрешения этого пограничного слоя необходимо использовать сетку с большим разрешением. Удвоенный пространственный размер по горизонтальным координатам отвечает за вытянутость области.

Построенные осредненные поля скорости вблизи твердой поверхности отвечают логарифмическому закону, при отдалении от пограничного слоя скорость соответствует закону вязкого трения.

Работа выполнена при поддержке бюджетной темы № 121112200078-7.

1. Shklyaev S.V., Alabuzhev A.A., Khenner M. Marangoni convection in a thin film on a vertically oscillating plate // Phys. Rev. E. 2015. V. 92, 013019.

2. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели – М. – Ижевск, 2010. – 332 с.

3. Kline S. J., Reynolds W. C., Schraub F. A., Runstadler P. W. The structure of turbulent boundary layers // J. Fluid Mech. 1967. V. 30. P. 741-773.

4. Abe H. Direct numerical simulation of a non-equilibrium three-dimensional turbulent boundary layer over a flat plate // J. Fluid Mech. 2020. V. 902. A20.

5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Том 2 – М.: Мир, 1991. – 552 с.

6. Harlow F.H., Welch J.E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface // The Physics of Fluids. 1965. V. 8. P. 2182-2189.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СЛАБОНЕСФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ С ЦЕНТРАМИ НА ОДНОЙ ПРЯМОЙ

Давлетшин А.И.

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань

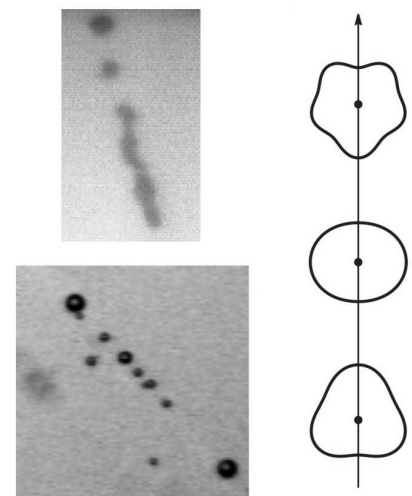
e-mail: anas.davletshin@gmail.com

Динамика пузырьков в жидкости в их разнообразных скоплениях может существенно зависеть от гидродинамического взаимодействия пузырьков [1-3]. В результате взаимодействия радиальные колебания пузырьков могут ослабляться или усиливаться, пузырьки могут перемещаться в жидкости, образовывать разнообразные устойчивые структуры. Взаимодействие между пузырьками может приводить к большим деформациям их поверхностей, в результате чего пузырьки могут разрушиться. Эти и другие особенности взаимного влияния пузырьков могут быть использованы в различных приложениях, например, при ультразвуковой очистке поверхностей тел от различных загрязнений во многих сферах деятельности, при интенсификации реакций в химии, при диагностике, доставке лекарств в медицине.

Для исследования взаимодействия пузырьков наиболее эффективными являются модели, в которых разрешающие соотношения представляются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). При получении таких уравнений используется метод разложения по малому параметру R/D , где R – характерный радиус пузырьков, D – характерное расстояние между их центрами. При таком подходе по мере уменьшения расстояния между пузырьками для адекватного описания их совместной динамики нужно использовать модели, имеющие все более высокий порядок точности относительно указанного параметра. Для исследования особенностей взаимодействия подвижных пузырьков в основном применяются модели от третьего до пятого порядка точности относительно R/D . В большинстве из этих моделей пузырьки считаются сферическими.

В настоящей работе предлагается математическая модель взаимодействия слабонесферических газовых пузырьков, центры которых расположены на одной прямой (оси симметрии задачи). Данная модель представляет собой полученную методом сферических функций систему ОДУ второго порядка относительно радиусов пузырьков, координат их центров на оси симметрии и амплитуд малых осесимметричных отклонений формы пузырьков от сферической. Учитывается влияние поверхностного натяжения, эффекты вязкости и сжимаемости жидкости предполагаются малыми и не зависящими от взаимодействия между пузырьками. Газ в пузырьках полагается гомобарическим, с давлением, изменяющимся по адиабатическому закону. Полученные уравнения имеют шестой порядок точности относительно параметра R/D , что, как минимум, на один порядок выше, чем у известных моделей. Это позволяет изучать взаимодействие более близко расположенных друг к другу пузырьков.

Проведена верификация полученных уравнений. Для этого было выполнено сравнение ряда их слагаемых с соответствующими слагаемыми других известных в литературе уравнений динамики взаимодействующих пузырьков. Кроме того, было проведено сопоставление результатов численного решения предложенных уравнений с известными теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.



Пузырьки с центрами на одной прямой: слева – в экспериментах [2, 3], справа – в модели настоящей работы.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 21-11-00100, <https://rscf.ru/project/21-11-00100/>).

1. Aganin A.A., Davletshin A.I. Equations of interaction of weakly non-spherical gas bubbles in liquid // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. V. 39. № 8. P. 1047-1052.
2. Luther S. Theoretische Beschreibung und experimentelle Untersuchung raum-zeitlicher Strukturbildung in akustischen Kavitationsblasenfeldern. – Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek, 2000.
3. Xu Y., Butt A. Confirmatory experiments for nuclear emissions during acoustic cavitation // Nuclear Engineering and Design. 2005. V. 235. P. 1317-1324.

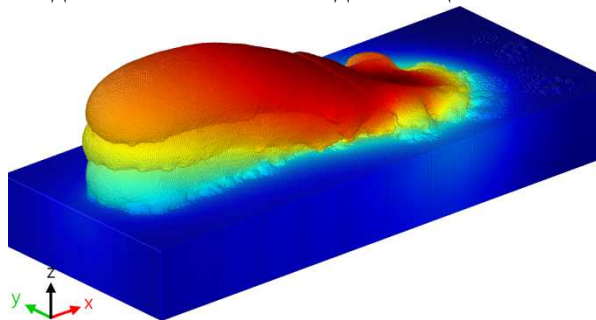
УЧЕТ ЭФФЕКТА СМАЧИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Давлятин Р.П., Трушников Д.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: romadavly@gmail.com

В настоящее время процесс аддитивного формирования изделий методом послойной проволочной наплавки успешно реализован разными научными группами, однако остается целый ряд проблем, одна из них – сложность определения оптимальных параметров процесса наплавки. Проблема усугубляется тем, что существующие пакеты математического моделирования не учитывают изменение геометрии изделия в реальном времени, поэтому толщина слоя является входным параметром, который определяется эмпирически. Для решения этой проблемы необходимо учитывать движение расплавленного металла, т.е. рассчитывать изменение геометрии в реальном времени. При этом традиционные сеточные методы, такие как, метод конечных элементов не позволят обеспечить необходимой производительности [1, 2], поэтому в работе используется один из бессеточных методов, метод гидродинамики сглаженных частиц [3]. Таким образом целью работы является доработка существующей математической модели процесса проволочной наплавки для учета эффекта смачивания, численная реализация и исследование [4, 5]. Улучшенная математическая модель должна точнее описывать геометрию одиночного валика и изделия в целом.



Визуализация результатов моделирования процесса проволочной наплавки стенки из 4 слоев.

С использованием разработанной модели была проведена серия численных экспериментов, направленных на её верификацию и исследование. Рассмотрено влияние смачивания на геометрические характеристики одиночных валиков для стали, бронзы и титана. Выявлено, что учет смачивания ведет к уменьшению ширины валиков.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» и выполнения государственного задания «Разработка научно-технологических основ формирования системы материал-конструкция со специальными свойствами на основе гибридных аддитивных технологий»-FSNM-2021-0011.

1. Trushnikov D.N., Hu R., Luo M., Liu T., Liang L., Huang A., Karunakaran K. P., Pang S. Thermal fluid dynamics of liquid bridge transfer in laser wire deposition 3D printing // Science and Technology of Welding and Joining. – 2019. – Vol. 24, No. 5. – pp. 401-411, DOI: 10.1080/13621718.2019.1591039.

2. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Rodyakina R.V. Numerical Modeling of Heat Transfer and Material Flow During Wire-Based Electron-Beam Additive Manufacturing // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – 2019. – pp. 1115-1125. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_119.

3. Meier C. et al. A novel smoothed particle hydrodynamics formulation for thermo-capillary phase change problems with focus on metal additive manufacturing melt pool modeling // Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng. - 2021. - Vol. 381. - 113812.

4. Trushnikov D.N. et al. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. 2019. Vol. 5, № 1. P. 4. doi: 10.1186/s40759-019-0044-1.

5. Davlyatshin R.P. et al. Mathematical modeling the process of wire surfacing by the smoothed particle hydrodynamics method // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1730, № 1. P. 012003. doi: 10.1088/1742-6596/1730/1/012003.

ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИИ НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА ПРИ НАГРЕВЕ СНИЗУ

Давыдов М.А., Черепанов И.Н., Кондрашов А.Н., Гончаров М.М.

Физический факультет ПГНИУ, Пермь

e-mail: imotwedow@gmail.com

Конвекция в бинарных смесях демонстрирует широкий спектр неустойчивостей, нелинейной эволюции и процессов самоорганизации [1]. Распределение концентрации влияет на плавучесть, т.е. движущую силу конвективных потоков [2]. Поле концентрации в бинарных смесях зависит от различных факторов: диффузии, термодиффузии (эффект Соре) [3] и конвективного перемешивания.

Коллоидная суспензия представляет собой жидкость-носитель, содержащую наночастицы с размерами в диапазоне от 10 до 100 нм. Градиенты концентрации, вызванные термодиффузией в коллоидной суспензии, превышают аналогичные градиенты в молекулярных смесях на порядок и более из-за больших значений коэффициентов Соре для наночастиц [4]. Экспериментальное исследование конвекции коллоидной суспензии в закрытой ячейке [5] продемонстрировало существование постоянной и переходной колебательной конвекции. В [6] показано, что своеобразная диаграмма бифуркации, полученная для *Nuflon MFA*, также будет присутствовать в других коллоидных суспензиях, характеризующихся большим отрицательным коэффициентом разделения.

Изучено влияние интенсивности диффузии на структуру конвективного течения коллоидной суспензии (*Nuflon MFA*) с объемной долей наночастиц φ_0 , заполняющей горизонтальный плоский слой с непроницаемыми твердыми границами. Рассмотрение проведено для случая подогрева слоя снизу.

Исследование порога устойчивости течений, проведенное в работе [7], показало, что с увеличением числа Льюиса (характеризующем интенсивности диффузии примеси) порог устойчивости течения изменяется нелинейно. При этом могут происходить смена типа конвективного течения между сильно- и слабо-модулированными бегущими волнами.

Изучена структура течения, а также переходные процессы возникающие при изменении числа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 20-01-00491).

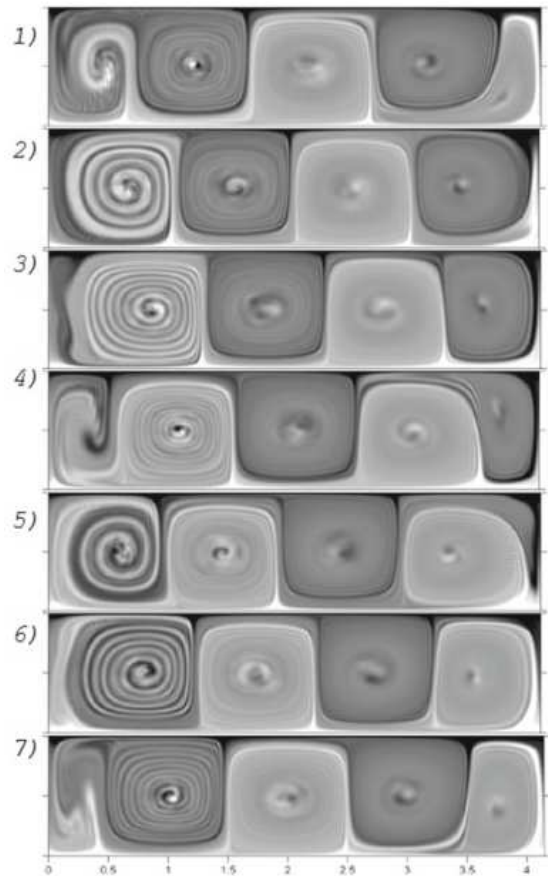


Рисунок 1 – Временной ряд снимков поля концентрации при $R = 2800$, сделанных с постоянным интервалом.

1. M.C. Cross, P.C. Hohenberg, *Rev. Mod. Phys.* 65, 851 (1993).
2. M. Lücke et al., *Evolution of Structures in Dissipative Continuous Systems*, 127, edited by F. H. Busse and S. C. Müller, *Lecture Notes in Physics*, Vol. m55 (Springer, Berlin, 1998).
3. J. Platten, J.C. Legros, *Convection in Liquids* (Springer, Berlin, 1984).
4. E. Blums et al., *J. Magn. Magn. Mater.* 169(1), 220 (1997).
5. G. Donzelli, R. Cerbino, A. Vailati, *Phys. Rev. Lett.* 102, 104503 (2009).
6. M. Bernardin, F. Comitani, A. Vailati, *Phys. Rev. E* 85, 066321 (2012).
7. I.N. Cherepanov, B.L. Smorodin *Traveling waves of a colloidal suspension in a closed cell* *Eur. Phys. J. E* (2022) 45:39.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ НЕСИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКОЙ

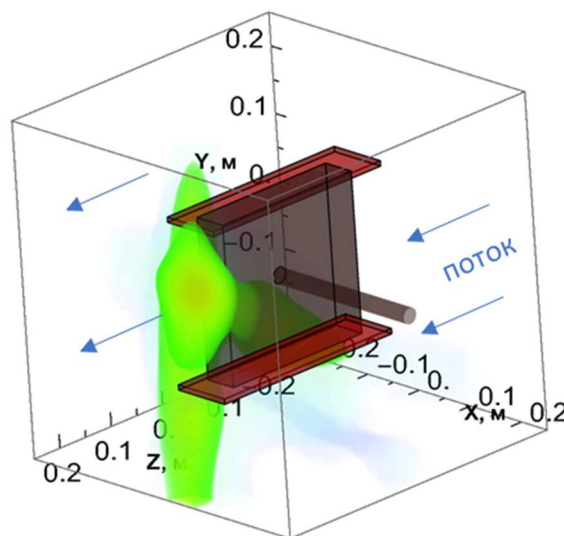
Демьянов М.А., Бычков О.П.

ФАУ ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ, Москва

e-mail: demyanov@phystech.edu

Ранее произведено обобщение стандартного метода бимформинг, предназначенного для локализации источников звука и определения их интенсивности, позволяющее взаимно учитывать данные от несинхронных измерений микрофонной решеткой из различных пространственных положений при постобработке [1]. Обобщенная процедура позволяет производить трехмерную идентификацию источников с помощью двух последовательных измерений одной плоской микрофонной решеткой в конфигурации типа прямого двугранного угла.

Разработанный метод применен к данным шума обтекания модели крыла с закрылком. Получены трехмерные карты локализации источников для различных режимов и характерных частот.



Результат локализации звукового источника.

1. Бычков О.П., Демьянов М.А. Обобщение стандартного алгоритма “бимформинг” для идентификации акустических источников с помощью несинхронных измерений микрофонной решеткой // Акустический Журнал, 2022, Т. 68, № 2, С. 162-172.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРА

Хасанов Д.¹, Диева Н.Н.¹, Кравченко М.Н.^{1,2}, Имамова Е.Ю.¹

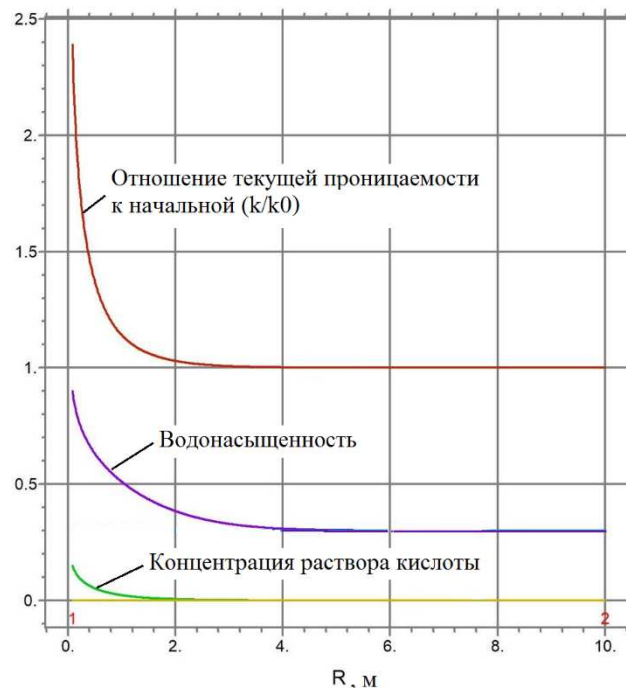
¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

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

e-mail: hasanov.tm@mail.ru

Работа посвящена исследованию особенностей химических процессов, возникающих в продуктивном пласте при его кислотной обработке. Воздействие водными растворами кислот на коллектор на сегодняшний день проводят для решения целого спектра задач: от кратковременных обработок призабойной зоны скважины для очищения от загрязнений, сопутствующих различным геолого-техническим мероприятиям, [1] до методик, представляющих собой основной метод воздействия на пласт для максимально эффективного извлечения из него углеводородов [2, 3].

Общий принцип организации закачки растворов кислот основан на растворении карбонатной части породы для повышения пропускной способности коллектора в зоне обработки за счет увеличения пористости и проницаемости. Рассматриваемый химический процесс сопровождается выделением углекислого газа и небольшим тепловым эффектом реакции, регистрируемым датчиками на забое скважины. Оба фактора напрямую связаны с повышением пропускной способности флюида, а именно снижают его вязкость.



Результаты расчета параметров модели. Распределение безразмерных параметров вдоль пласта.

Авторами работы предложена математическая модель закачки водного раствора кислоты в продуктивный горизонт, учитывающая растворение газа в нефти в способности её сжиматься. Также исследованы эффекты повышения температуры пласта в зоне обработки и учтены в модели вязкости флюида. Получены профили распределения основных параметров процесса в динамике вдоль пласта. На рисунке приведен один из результатов для промежуточного момента времени.

1. Акопов А.С., Каверзин С.А., Климов К.Д. Соляно-кислотные обработки продуктивного пласта - как инструмент восстановления проницаемости ПЗП скважин, завершенных строительством // Актуальные проблемы наук о земле. Материалы VIII (65-ой) ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2021. 396 с. С. 323-328.

2. Рахманкулов М.Т., Нодиров Э.Ш., Хамраев Б.Ш., Самадов Ш.Ш. Особенности применения кислотных обработок в карбонатных породах для интенсификации дебитов скважин // Web of Scholar. 2017. Т. 1. № 9 (18). С. 18-20.

3. Бурнашев В.Ф., Ирматов Э.К., Хужаёров Б.Х. Термокислотная обработка прискважинной зоны нефтяного пласта // ИФЖ. 2015. Т 88. № 3. С. 591-600.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ АСПЕКТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА ФОНЕ ВОЛНОВЫХ АТТРАКТОРОВ

Елистратов С.А.^{1,2}, Сибгатуллин И.Н.^{1,2}, Ерманюк А.Г.³

¹МГУ им. М.В. Ломоносов, Москва

²Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

³Институт Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск

e-mail: sa.elist-ratov@yandex.ru

Динамика внутренних и инерционных волн в замкнутой области обладает замечательным свойством фокусировки траектории волновых пакетов на замкнутом пути, называемом волновым аттрактором. В вязкой жидкости значительный рост амплитуды волн на волновом аттракторе приводит к образованию неустойчивостей. При этом, переход к турбулентности и описание полностью турбулентного режима существенно отличаются от движения в области без волнового аттрактора. Предыдущие исследования демонстрируют ключевую роль каскада триадных резонансов в формировании развитой турбулентности, и при наличии опрокидываний, и без. При этом не принималось во внимание, что важным фактором, влияющим на характеристики движения вязкой жидкости, является форма области, а именно соотношение горизонтального и вертикального масштабов движения. В настоящей работе были выявлены кардинальные различия течений в геометрии с разными аспектными соотношениями и проведено детальное спектральное исследование, включающее временной и пространственный Фурье-анализ. Оказалось, что при большом аспектном соотношении порядка десяти, возникает существенно большая концентрация относительной кинетической энергии [1] и возникновение каскада триадных резонансов сменяется супергармоническим каскадом и каскадом на полуцелых частотах. При этом каскад пространственных структур также соответствует другому наклону спектра, чем для каскада триадных резонансов. Исследование зависимости времени установления режимов позволяет сделать выводы о реализуемости течений в меняющихся внешних условиях. Результаты применения методов визуализации вихревых течений в применении к волновым режимам и существенные отличия в характеристиках спектров при аспектном соотношении порядка единицы и порядка десяти говорят о необходимости исследования промежуточных режимов.

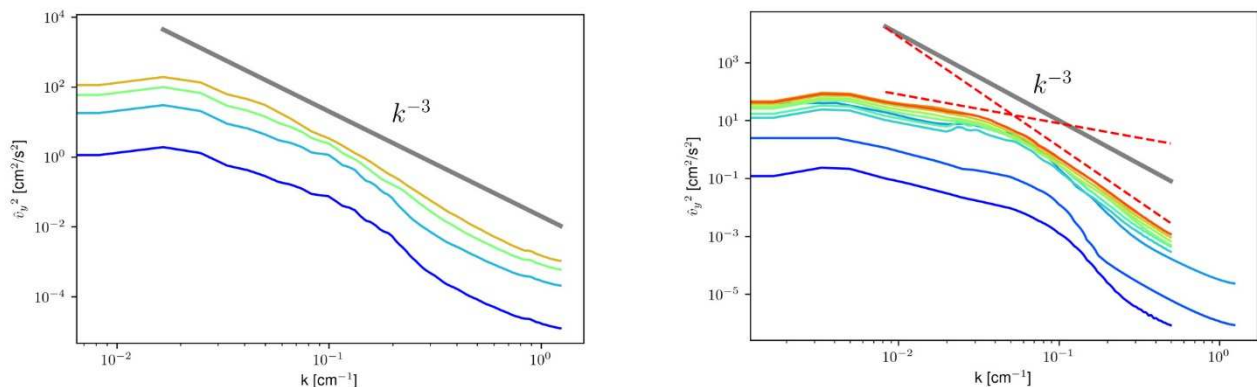


Рис. 1 а. Эволюция спектров при увеличении амплитуды внешнего воздействия при малом (слева) и большом (справа) аспектном соотношении.

1. Моделирование аккумуляции кинетической энергии внутренних волн в областях с большим отношением горизонтального и вертикального масштабов / С. А. Елистратов, К. А. Ватутин, И. Н. Сибгатуллин и др. // Труды Института системного программирования РАН (электронный журнал). – 2020. – Т. 32, № 6. – С. 200–212.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГРЕБНОГО ВИНТА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЯВЛЕНИЙ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

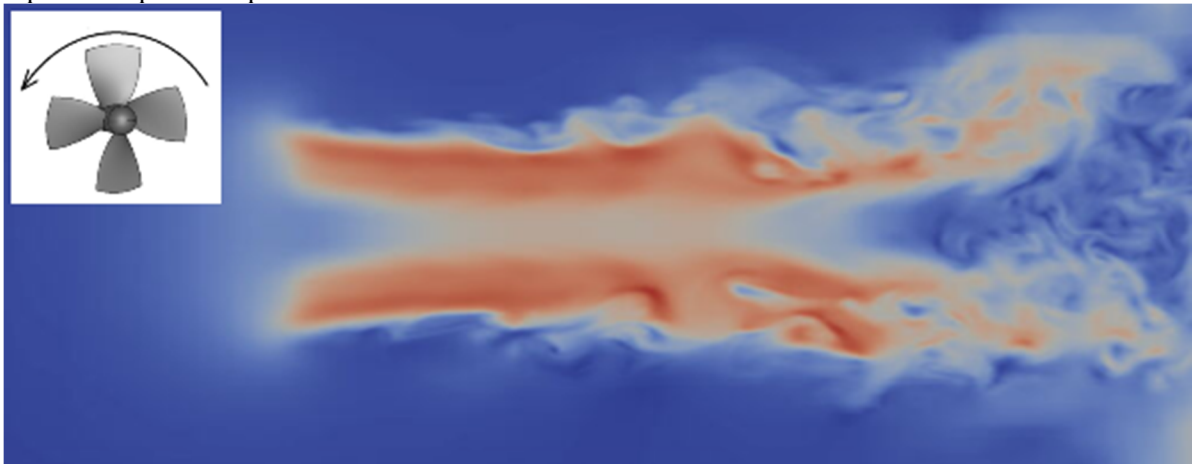
Бритов А.Д.¹, Ярикова С.П.¹, Потапов И.И.², Епихин А.С.¹, Сибгатуллин И.Н.¹

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

²ВЦ ДВО РАН, Хабаровск

e-mail: britovad@ispras.ru, andy_e@bk.ru

При численном моделировании гидродинамики гребных винтов необходимо соблюдать баланс между вычислительными затратами и точностью получаемых результатов. Зачастую оказывается, что вполне достаточно заменить полное разрешение поверхности гребного винта на упрощенную модель, что дает возможность сэкономить вычислительные ресурсы. Такие подходы различаются по простоте воспроизведения и точности выдаваемых результатов. С другой стороны, течение от гребного винта может приводить к размыву донной поверхности, что необходимо учитывать при комплексном моделировании работы гребных винтов.



Мгновенная структура поля скорости за гребным винтом.

В данном учебном треке рассматривается реализация упрощенной модели численного моделирования гидродинамики гребного винта в пакете OpenFOAM. Цель данного учебного трека – рассказать об особенностях и возможностях применения пакета OpenFOAM и его библиотек для моделирования гидродинамики гребного винта и сопутствующих явлений, дать навыки работы с ними на тестовых примерах.

Учебный трек будет разделен на две части: теоретическая и практическая. В рамках теоретической части будут затронуты следующие вопросы:

- описание базовых уравнений гидродинамики;
- описание базовых уравнений движения донных наносов;
- упрощенные модели моделирования гребных винтов;
- описание базовых принципов работы решателей и библиотек OpenFOAM.

В рамках практической части:

- сборка необходимых библиотек и решателей;
- настройка начальных и граничных условий в пакете OpenFOAM и его библиотеках;
- запуск численных расчетов тестовых примеров;
- пример расчета донных деформаций.

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

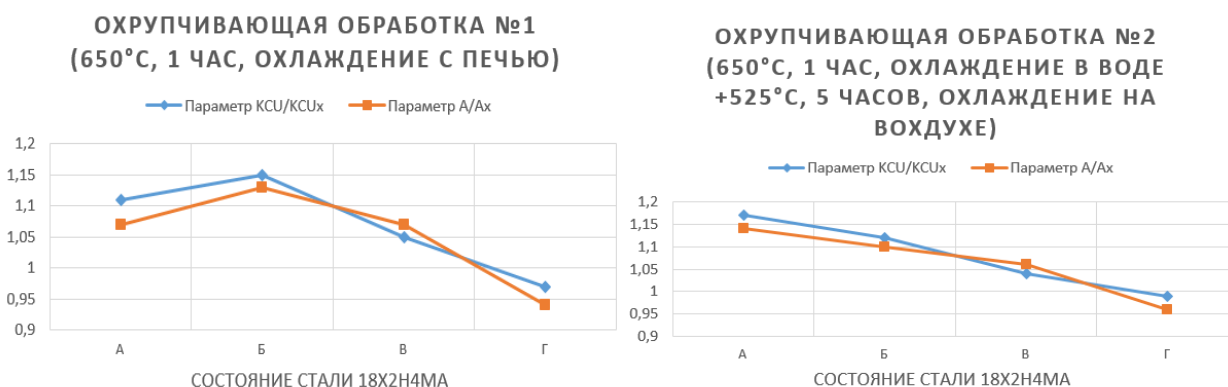
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-57-53019.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТАЛИ ПУТЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОБРАТИМОЙ ОТПУСКНОЙ ХРУПКОСТИ

Ереев М.Н., Ершова М.И.
АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород
e-mail: maria.1@mail.ru

Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности ответственных конструкций ЯЭУ актуально проведение исследований на предмет радиационного охрупчивания сталей [1]. С этой целью исследована схожесть процессов при развитии обратимой отпускной хрупкости и радиационного охрупчивания сталей, которая дает возможность при оценке свойств облученных материалов моделировать радиационное воздействие инициированием развития обратимой отпускной хрупкости.

Сталь 18Х2Н4МА используется для изготовления ответственных деталей ЯЭУ, трубопроводов, опор трубопроводов, сепараторов-пароперегревателей, комплектующих к ним и другого оборудования. Для стали 18Х2Н4МА исследовано поведение параметров КСУ/КСУ_х и А/А_х с целью оценки ее склонности к обратимой отпускной хрупкости при измельчении зерна и уменьшении химической микронеоднородности матрицы. Установлено, что оба оценочных параметра дают близкие по величине результаты. Как следует из графиков, представленных ниже, наибольшей склонностью к обратимой отпускной хрупкости обладает литая сталь 18Х2Н4МА (состояние Б), а также горячедеформированная сталь (состояние А). Проведение для литой стали циклической гомогенизации при температуре 1050°C (состояние В) делает сталь 18Х2Н4МА практически не склонной к обратимой отпускной хрупкости, а после циклической гомогенизации при температуре 1250°C (состояние Г) "охрупчивающие" обработки даже несколько увеличивают вязкость стали по сравнению с "вязким" состоянием – после охлаждения в воде (КСУ/КСУ_х и А/А_х) [2].



Влияние охрупчивающих обработок сталей на относительное изменение параметров КСУ и А.

Следовательно, предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости в стали 18Х2Н4МА в результате проведения циклической гомогенизации связано с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе. Кроме того, такая обработка подтверждает схожесть процессов при развитии обратимой отпускной хрупкости и при радиационном охрупчивании сталей. Это обстоятельство может позволить при разработке методов оценки свойств облученных материалов моделировать радиационное воздействие инициированием развития обратимой отпускной хрупкости [2].

1. Крюков Л. Т., Ершова М. И. Контроль механических свойств материалов реакторного оборудования по параметрам микропластической деформации // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2019. №3 (126). С. 67-72.

2. Ершова М. И., Крюков Л. Т. Использование параметров микропластической деформации для оценки охрупчивания материалов реакторного оборудования // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2020. №2 (129). С. 77-84.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ РАЗЛИЧНОЙ КРУПНОСТИ

Фатталов О.О.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}, Филиппов Л.О.³, Филиппова И.В.³

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

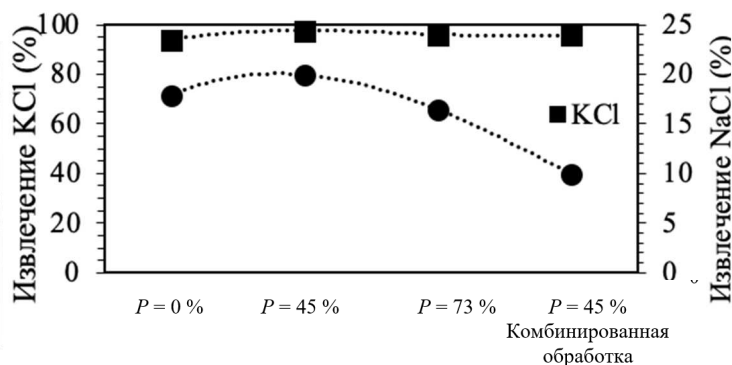
² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

e-mail: fattalov@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса флотации калийной руды при ультразвуковом (УЗ) воздействии. Эксперименты, проведенные при одинаковой дозировке ПАВ (NORAM SH) для трех различных фракций руды, показали, что извлечение KCl и NaCl в отсутствие УЗ обработки зависит от крупности руды. При уменьшении размера частиц от крупной фракции 0,5 – 1 мм до средней фракции 0,25 – 0,5 мм извлечение KCl в пенный продукт увеличивается с 82% до 97%, что, по-видимому, связано с низкой вероятностью отрыва частиц мелкой фракции от пузырьков по сравнению с крупной фракцией. Извлечение калийной руды мелкой фракции 0,25 – 0,1 мм составило около 92%.

В экспериментах при использовании УЗ обнаружено, что ультразвук оказывает значительное влияние на флотацию крупных частиц за счет усиления отрыва частиц от пузырьков. Обработка ультразвуком высокой интенсивности приводит к значительному увеличению селективности средней 0,5 – 0,25 мм и мелкой 0,25 – 0,1 мм фракций с соответствующим снижением извлечения хлорида натрия из-за уменьшения поверхностной гидрофобизации. При мощности обработки ультразвуком до $P = 45\%$, извлечение сильвина из фракции среднего размера остается неизменным и высоким (90 – 92%), в то время как извлечение NaCl снижается. На флотацию KCl из мелкозернистой фракции (0,25 – 0,1 мм) обработка ультразвуком не влияет, в то время как извлечение галита значительно снижается, что позволяет переработать фракцию такой крупности, которая, по традиционной схеме переработки калийной руды, сбрасывается в хвосты [1]. Полученные экспериментальные данные, могут помочь инженерам отрасли оптимизировать параметры обработки ультразвуком, когда требуется повышение селективности между сильвином и галитом. Уменьшение содержания NaCl в концентрате при обработке ультразвуком может разблокировать руду с низким содержанием или уменьшить потери сильвина с фракциями шлама.



Слева - флотационная камера с источником УЗ, справа - сравнение двух методов ультразвуковой обработки минеральной суспензии для флотации солей KCl и NaCl: (0,1 – 0,25 мм; NORAM SH: 100 г / т).

Полученные экспериментальные данные, могут помочь инженерам отрасли оптимизировать параметры обработки ультразвуком, когда требуется повышение селективности между сильвитом и галитом. Уменьшение содержания NaCl в сильвитовом концентрате при обработке ультразвуком может разблокировать руду с низким содержанием или уменьшить потери сильвита с фракциями шлама.

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

1. 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДАВЛЕНИЯ И ДЕБИТА СКВАЖИНЫ С ГРП В СЛУЧАЕ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Фокеева Н.О.^{1,2}, Башмаков Р.А.^{1,3}

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

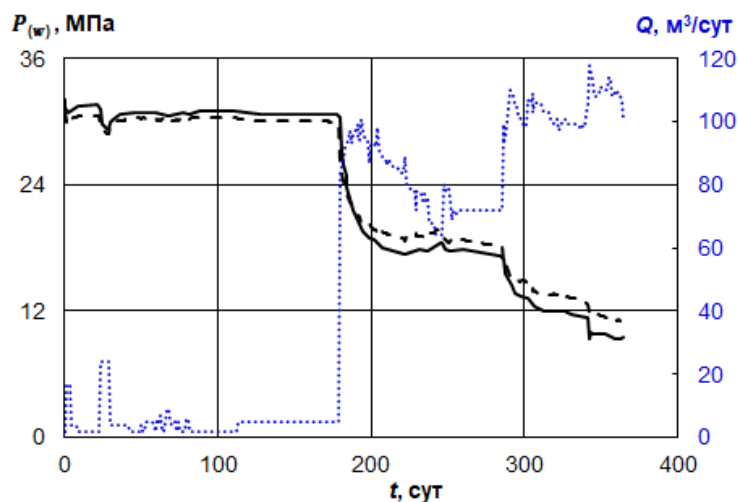
² ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

³ Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: ffoxnina@gmail.com, Bashmakov_Rustem@mail.ru

Гидроразрыв пласта (ГРП) уже более 70 лет активно применяется в нефтегазовой отрасли. Учитывая, нынешнюю ситуацию, которую кратко можно охарактеризовать, как истощение традиционных нефтегазовых запасов, метод ГРП, являясь один из важнейших методов интенсификации добычи нефти из низкопроницаемых пластов, не теряет своей актуальности.

Множество работ описывают распределения давления и дебита скважин, а также процесс ГРП. Так, например, в статье [1] рассматривались задачи об эволюции давления в окрестности трещины ГРП при поддержании постоянного дебита. Данный доклад посвящен переменному режиму работы скважины: случай изменения давления на скважине и случай изменения дебита скважины. В обоих случаях получены формулы, описывающие распределение давления в трещине. Были выведены аналитические решения, показывающие взаимосвязь между дебитом и давлением, как на скважине, так и в трещине. Эти решения можно применять для определения дебита на основе известной динамики изменения давления и наоборот, а также для определения эволюции давления в трещине ГРП.



По основной оси - сопоставление известного промыслового давления (сплошная линия) и результатов вычислений (пунктирная линия); по вспомогательной оси - промысловый дебит (синяя точечная линия).

Полученные уравнения опробованы на практике [2]. Авторам были предоставлены промысловые данные работы скважины: время, давление, дебит. На основе известного дебита было построено давление и проанализировано в сравнении с известным промысловым. Динамика изменения кривых и диапазон значений сопоставим, что приводит к выводу о применимости уравнений и подхода. Также решение позволяет оценить проводимость трещины ГРП.

1. Шагапов В.Ш., Нагаева З.М. К теории фильтрационных волн давления в трещине, находящейся в пористой проницаемой среде // ПМТФ. 2017.Т.58, №5. С. 121-130.

2. Башмаков Р.А., Фокеева Н.О., Шагапов В.Ш. Особенности фильтрации флюидов в коллекторах, подверженных гидроразрыву пласта, при переходных режимах работы скважины // ПМТФ. 2022. Т.63, №3. (выходит в печать).

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА

Гайфуллин Р.Ю.¹, Мусабиров И.И.¹, Сафаров И.М.¹, Галеев Р.М.¹, Асылбаева Р.А.²,
Алиев А.М.³, Гаджиев А.Б.³

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

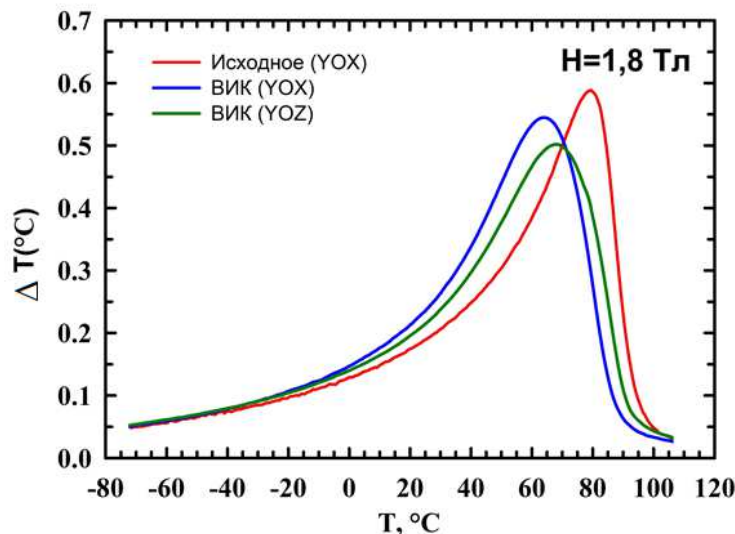
²Башкирский государственный университет, Уфа

³Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала

e-mail: gaifullin_1998@mail.ru

Сплавы Гейслера в области мартенситного превращения обладают сочетанием таких уникальных функциональных эффектов как ферромагнитный эффект памяти формы, магнитокалорический эффект, гигантское магнитосопротивление и др. Существенным недостатком сплавов в монокристаллическом и поликристаллическом состоянии являются пониженные эксплуатационные свойства. При многократных циклах мартенситного превращения, образцы сплавов разрушаются вследствие накопления дефектов, формирующихся упругими напряжениями при фазовом превращении. Одним из способов повышения эксплуатационных свойств материала является деформационно-термическая обработка (ДТО). При этом необходимо учитывать тот факт, что обработка может снизить величины функциональных эффектов из-за изменения зеренной микроструктуры и уменьшения среднего размера зерна.

В данной работе представлены результаты исследования магнитокалорического эффекта в поликристаллическом сплаве $\text{Ni}_{2.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Ga}_{0.93}\text{Si}_{0.07}$ в исходном литом состоянии и после ДТО методом всесторонней изотермическойковки (ВИК). Преимущество этого метода деформационной обработки заключается в более высокой плотности дислокаций, высоком уровне внутренних напряжений и необходимой микроструктуре в получаемом объемном слитке материала.



Магнитокалорический эффект в поле 1,8 Тл в сплаве в исходном состоянии (красная линия), после ВИК на образцах, вырезанных во взаимно перпендикулярных плоскостях YOХ (синяя линия) и YOZ (зеленая линия).

Как видно из рисунка пиковая величина МКЭ составляет 0,59°C в магнитном поле 1,8 Тл при температуре 79,5°C. Чувствительность при этом составляет 0,33°C/Тл. В результатековки эта величина снижается до 0,55°C при 63,9°C (0,31°C/Тл) и 0,50°C при 67,9°C (0,28°C/Тл) для плоскостей YOХ и YOZ соответственно. При этом наблюдается смещение пиковых значений МКЭ в область низких температур, что обусловлено смещением мартенситного превращения в результате ДТО. В целом величина МКЭ как в исходном, так и кованном состоянии являются не столь значительными для данных сплавов. Из литературных данных известно, что средняя величина эффекта составляет около 1°C/Тл [1]. Однако положительным моментом является то, что в результате ВИК не наблюдается значительной деградации функционального эффекта.

1. V.V. Khovaylo. Inconvenient magnetocaloric effect in ferromagnetic shape memory alloys. // J. Alloys Comp. 2013. V. 577, № 1. P. 362-366.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВОРОТА ВИБРАЦИОННОГО РОБОТА ВОКРУГ ВЕРТИКАЛИ

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

В настоящей работе рассматривается движение по шероховатой плоскости вибрационного робота [1], состоящего из корпуса, двух однородных маховиков и невесомой рамки с дебалансом – материальной точкой некоторой массы. Схема механической системы представлена на рисунке 1.

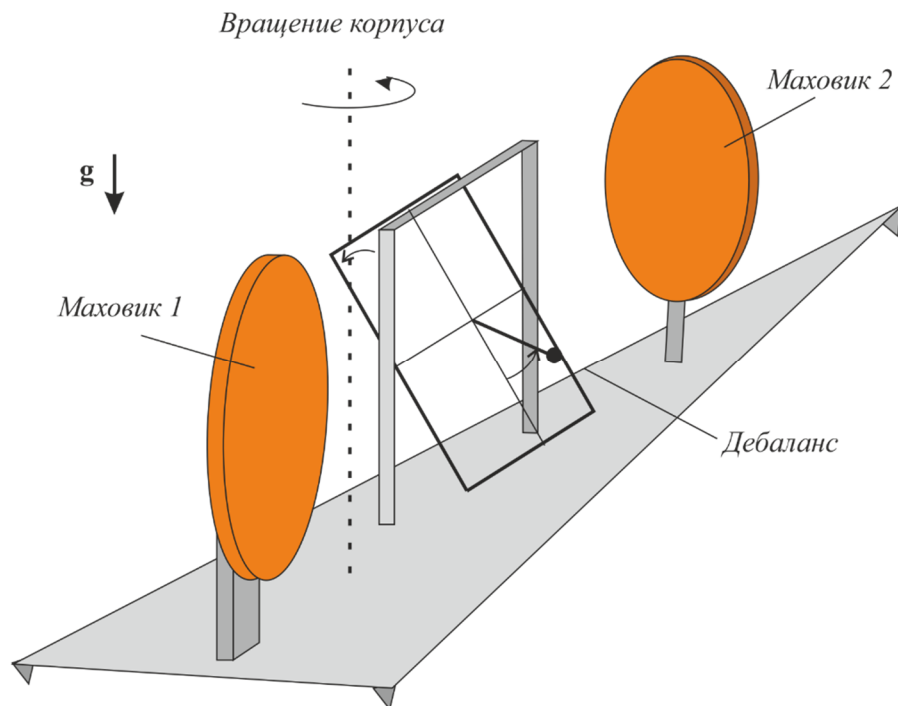


Рис. 1: Схема механической системы.

Двигающиеся части робота изолированы от внешнего воздействия, за счёт чего такое устройство может найти применение в условиях агрессивных сред, при тушении пожаров или на других планетах.

Задача маховиков состоит в том, чтобы поддерживать дно корпуса горизонтальным, обеспечивая нулевой крен и тангаж. Дебаланс движется по окружности в плоскости рамки, отклонённой от вертикали на установочный угол.

По аналогии с [2], для системы описаны две возможные фазы движения:

- Разгон, при котором корпус покоится за счёт силы трения, а дебаланс движется ускоренно и набирает количество движения.
- Полёт. Дебаланс замедляется и изменяет количество движения и кинетический момент корпуса, в результате чего нормальные реакции уменьшаются до нуля. Далее корпус устремляется за дебалансом и совершает перемещение с вращением вокруг вертикали.

Построена математическая модель плоскопараллельного движения. Показана принципиальная возможность управления дебалансом, результатом которого является поворот робота в горизонтальной плоскости. Описаны зависимости угла поворота корпуса от параметров системы. Определены условия полной остановки корпуса после совершения поворота. Проанализировано смещение корпуса из начального положения.

1. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994.

2. M.Dosaev, V. Samsonov, S.Hwang. Construction of control algorithm in the problem of the planar motion of a friction-powered robot with a flywheel and an eccentric weight. Applied Mathematical Modelling 2021. V89 part 2, pp. 1517-1527.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМОДАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В КРУГЛОЙ ЛАМИНАРНОЙ СТРУЕ

Гареев Л.Р.¹, Ашууров Д.А.¹, Веденеев В.В.¹, Иванов О.О.²

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

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

e-mail: gareev.lr@yandex.ru

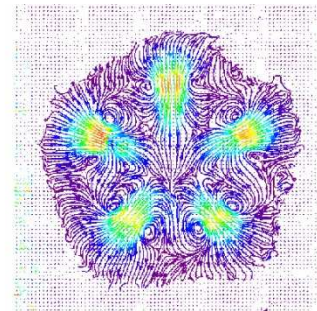
В пристенных течениях, наряду с ростом мод неустойчивости, важную роль играет немодальный (алгебраический) механизм линейного роста [1]. В неограниченных течениях немодальный механизм роста стал теоретически изучаться лишь в последнее десятилетие [2,3], в экспериментах этот механизм до сих пор не был идентифицирован. Изучение устойчивости ламинарных затопленных струйных течений и рост возмущений затруднено, прежде всего, низкими критическими числами Рейнольдса Re и быстрым переходом к турбулентности.

Работа посвящена экспериментальному исследованию развития стационарных возмущений в осесимметричной ламинарной затопленной струе, создаваемой специальным формирующим устройством с выходным диаметром $D=0.12$ м, при большом числе Рейнольдса ~ 6000 и большой длине ламинарного участка $\sim 5.5D$ [4].

Немодальный механизм линейного роста возмущений исследовался экспериментально при помощи внесения в поток специально разработанных тонких (0.6 мм толщина стенки) пластиковых конструкций (дефлекторов) с разными синусоидально возмущенными выходными сечениями (с азимутальными числами $n=1-5$).

Проведенные серии визуализаций струи лазерным ножом, термоанемометрических и PIV экспериментов позволили экспериментально зафиксировать немодальный механизм роста возмущений, аналогичный “lift-up” эффекту в пограничных слоях, а также показали линейный рост продольной скорости возмущения при постоянстве поперечной компоненты. Полученные результаты показывают хорошее соответствие предсказаниям линейной теории устойчивости.

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



Слева направо: дефлектор с синусоидальным искривлением выходного сечения $n=5$; визуализация поперечного сечения возмущенной струи; структура возмущения в поперечной к оси струи плоскости, полученная PIV методом.

1. Farrell B.F., Ioannou P.J. Optimal excitation of three-dimensional perturbations in viscous constant shear flow // Phys. Fluids A. 1993. V. 5. P. 1390–1400.
2. Boronin S.A., Healey J.J., Sazhin S.S. Non-modal stability of round viscous jets // J. Fluid Mech. 2013. V. 716. P. 96–119.
3. Jimenez-Gonzalez J.I., Brancher P., Martinez-Bazan C. Modal and non-modal evolution of perturbations for parallel round jets // Physics of Fluids. 2015. V. 27. №. 4. 044105.
4. Julia Zayko, Sergei Teplovodskii, Anastasia Chicherina, Vasily Vedeneev, Alexander Reshmin. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // Phys. Fluids 30(043603), 2018.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОСТНЫХ ОРГАНОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Герасимов О.В., Рахматулин Р.Р., Шарафутдинова К.Р.

Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского, Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань

e-mail: valeriy.karasikov@gmail.com

Применение данных изображений выступает актуальным подходом к моделированию негетерогенных сред. Наиболее распространёнными оказываются методы гомогенизации, среди которых выделяют построение МП-распределения [1] и представительные объёмные элементы [2]. Целью исследования выступает реализация методики оценки прочностных параметров костей по данным цифрового двойника.

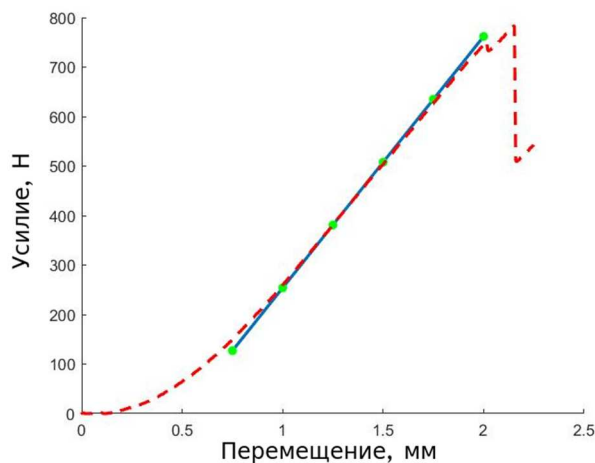


Рис. 1. Диаграмма разрушения: красная линия -- экспериментальные данные; синяя линия -- численное моделирование.

Подход основан на взвешенном интегрировании матрицы жёсткости [3]. Весовая функция определялась бинаризованными данными томографии. Напряжённо-деформированное состояние локально усреднялось по объёму. Оценка результатов определялась нормированной ошибкой энергии. Элементы с низким содержанием материала удалялись из сетки. Эксперименты проводились на плечевой кости свиньи. Протокол эксперимента был одобрен Комитетом по уходу за животными Казанского государственного медицинского университета (протокол №5 от 20 мая 2020 года). Нагружение соответствовало трёхточечному изгибу. Результаты моделирования сравнивались с натурным экспериментом (рис. 1).

Максимальные значения ошибки энергии соответствовали граничным элементам. Минимальная ошибка энергии (5.9%) и

максимальные напряжения по Мизесу (430МПа) принадлежали области нагружения. Образование трещины определялось максимальными значениями первой компоненты главных напряжений (390МПа) и минимальными – третьей (-430МПа).

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам (СП-4182.2022.4).

1. Kichenko, A.A., Tverier, V.M., Nyashin, Y.I., Zaborskikh, A.A. Experimental determination of the fabric tensor for cancellous bone tissue // Russ. J. Biomech. – 2011. – Vol. 15(4). – P. 66-81.

2. Ridwan-Pramana, A., Marcian, P., Borak, L., Narra, N., Forouzanfar, T., Wolff, J. Finite element analysis of 6 large PMMA skull reconstructions: A multi-criteria evaluation approach // PLoS ONE. – 2017. – Vol. 12. – e0179325.

3. Rho, J.Y., Hobatho, M.C., Ashman, R.B. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone // Medical Engineering & Physics. – 1995. – Vol. 17(5). – P. 347-355.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ НАГРЕТЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН НА СТРУКТУРУ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Голдобин А.А., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Попов Е.С., Селетков Б.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: arseniy34259@gmail.com

К настоящему времени решению проблемы детализации процесса разрушения конвективного факела тороидального вида в ходе формирования структуры течения, вызванного локальным нагревом тел конечных размеров, посвящено множество работ [1,2,3]. Полученные в них наработки находят применение в проектировании систем охлаждения и вентиляции. Однако при изучении литературы, не было обнаружено исследования, направленных на описание развития конвективного течения над поверхностью нагретых пластин различной формы.

В связи с этим в работе исследуется свободная тепловая конвекция над нагретыми в форме различных правильных n -угольников, вписанных в окружность с фиксированным диаметром D . Проводится численное трехмерное моделирование в резервуаре, заполненном водой при фиксированных граничных условиях. Рассматривается начальная стадия развития тепловой конвекции при различных значениях управляющего параметра, в качестве которого выступает число Релея Ra , определенное по соотношению между площадью и периметром нагревателя. Особое внимание уделяется изучению структуры течения жидкости, а также эволюции температурного поля в плоскости центрального сечения пластин. В рамках исследования рассматриваются различные условия нагрева: $n \in (3, 5)$, $Ra \in (1.0 \cdot 10^2, 1.3 \cdot 10^5)$. Стандартная система уравнений Навье-Стокса численно решается методом конечных элементов для систематического изучения конвекции от источников тепла различных размеров с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics.

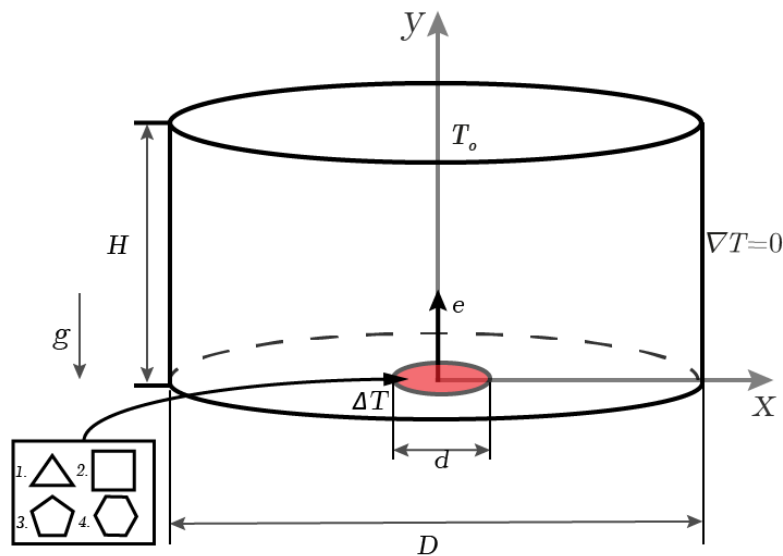


Рис. 1. Схема расчетной области.

В ходе работы показана зависимость значения критического числа Релея от фактора формы нагревателя, при котором наблюдается разрушение торообразного течения. Кроме того, проводится экспериментальное исследование для проверки результатов численного моделирования. В результате получено качественное соответствие расчетной и наблюдаемой структур течения в ходе экспериментов.

1. Matvey Maksimovich G. et al. Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders //Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.

2. Fan Y. et al. Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces: A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications// Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 10. – С. 101301.

3. Jiang Y., Nie B., Xu F. Scaling laws of buoyant flows on a suddenly heated horizontal plate// International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 105. – С. 58-64.

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ ГОРИЗОНТОВ В ЗАТОПЛЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ КОЛЕБАНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Долматова А.В.^{1,2}, Голдобин Д.С.^{1,3}

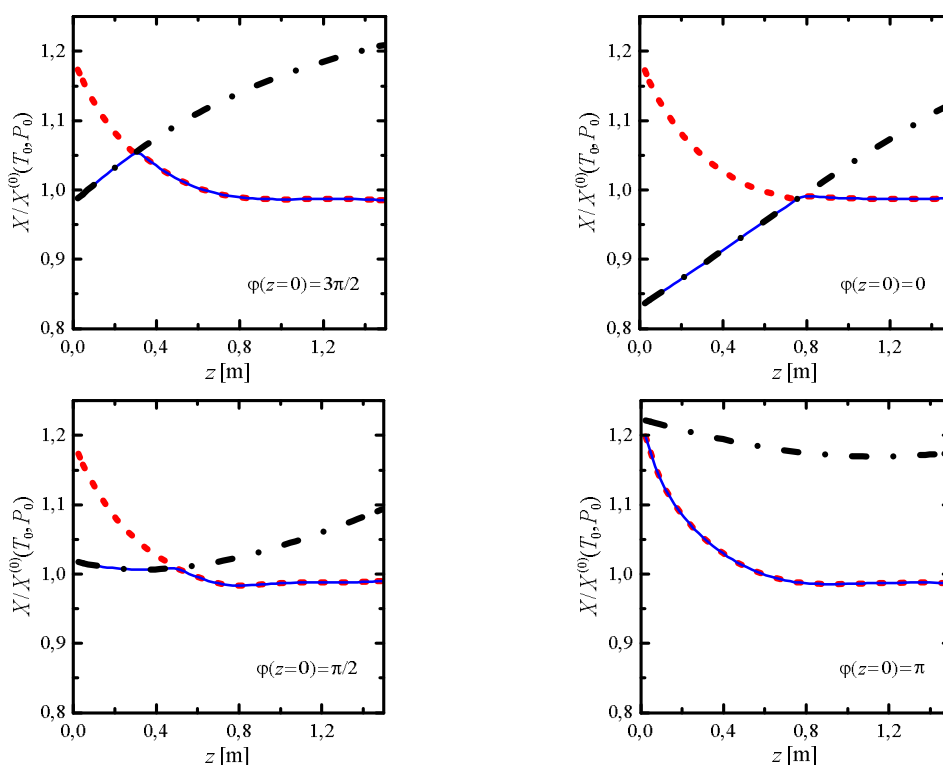
¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

³Пермский национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: Denis.Goldobin@gmail.com

Рассматривается неизотермический диффузионный перенос слабо растворимого вещества в пористой среде, насыщенной жидкостью, при контакте с резервуаром этого вещества. Температура поверхности полупространства пористой среды периодически изменяется во времени, что приводит к появлению затухающей волны растворимости, распространяющейся вглубь пористой среды. В такой системе зоны насыщенного раствора и нерастворенной фазы сосуществуют с зонами недонасыщенного раствора. Описываемый эффект рассмотрен для случая годовых колебаний температуры поверхности водонасыщенного грунта, находящегося в контакте с атмосферой. Описано явление формирования приповерхностного пузырькового горизонта вследствие колебаний температуры [1, 2]. Разработана аналитическая теория данного явления. Установлено, что для многокомпонентных растворов в системе возникает диффузионный пограничный слой, который невозможен для однокомпонентных растворов. Построено аналитическое описание диффузионного слоя и найдены эффективные граничные условия для задачи диффузионного транспорта за его пределами. Аналитические результаты хорошо согласуются с результатами численного счета.



Штрихпунктирные линии – профили растворимости азота, формирующиеся при прохождении годовой волны температуры в затопленной почве (лето, осень, зима, весна). Сплошная линия – молярная концентрация раствора, пунктирная линия – суммарная молярная доля азота в порах.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 121112200078-7.

1. Goldobin D.S., Krauzin P.V. Formation of bubbly horizon in liquid-saturated porous medium by surface temperature oscillation // Physical Review E. 2015. Vol. 92. No. 6. P. 063032.

2. Голдобин Д.С., Долматова А.В. Повышенное насыщение жидкости в пористой среде атмосферными газами за счет колебаний температуры поверхности // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14. № 4. С. 454-471.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА-ТРИМАРАНА ПРИ ЕДИНСТВЕННОМ УПРАВЛЯЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Голованов С.А.

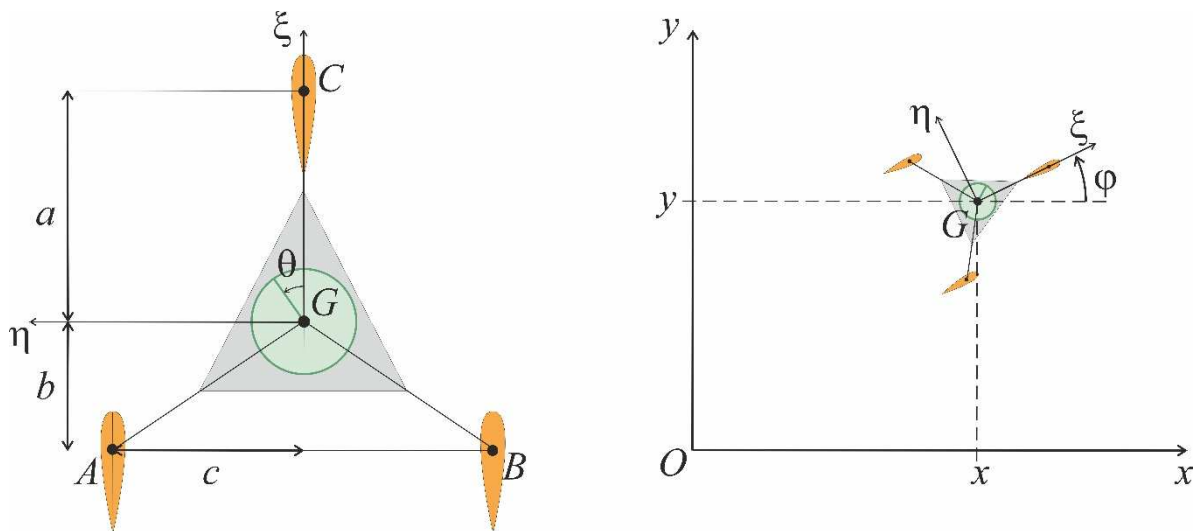
Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: serj-great@mail.ru

Введение: Роботы, передвигающиеся в жидкостях за счет перемещения внутренних масс, востребованы для применения в средах с сопротивлением. Такие роботы могут применяться даже в медицинских целях. Подробный обзор исследований жидких капсульных роботов можно найти в [1]. Среди классических результатов в этой области можно отметить такие работы, как [2-3].

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



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

Ключевые слова: робот-тримаран, движение внутренней массы, квазистатическая модель.

1. KILIN A., KLENOV A., TENENEV V.: Controlling the movement of the body using internal masses in a viscous liquid. Computer research and modeling 2018, 10(4):445-460.
2. KOZLOV V., RAMODANOV S.: The Motion of a Variable Body in an Ideal Fluid. Prikl. Mat. Mekh. 2001, 65(4):592–601 (in Russian).
3. CHERNOUS'KO F.: The optimal periodic motions of a two-mass system in a resistant medium. J. of Applied Mathematics and Mechanics 2008, 72(2):116-125.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МАШИН, ДВИГАЮЩИХСЯ ПО ВОДЕ

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

В работе рассматриваются машины, способные двигаться как по суше, так и по воде. При этом не требуется изменения в конструкции объекта. Для движения по поверхности воды, достаточно развить нужную линейную скорость и возможность её поддерживать за счёт специальной формы колёс (обычно колёса снабжены грунтозацепами). Машина держится на поверхности воды за счёт действия подъёмной силы, действующей на нижнюю часть колёс (гусеницы). Она уравнивает силу тяжести. Для этого необходимо, чтобы вес был ниже, а скорость, которую должна развивать машинка, должна быть достаточно большой. Это всё накладывает ограничения на конструкцию таких машин.

В работах [1,2] была составлена математическая модель для гусеничного объекта (рис. 1), которая в достаточной степени совпадала с движением реального объекта. На основе этой модели была проведена оценка в использовании таких машин в реальных условиях. Дан диапазон параметров массовых и геометрических характеристик объекта, а также параметры двигателя.

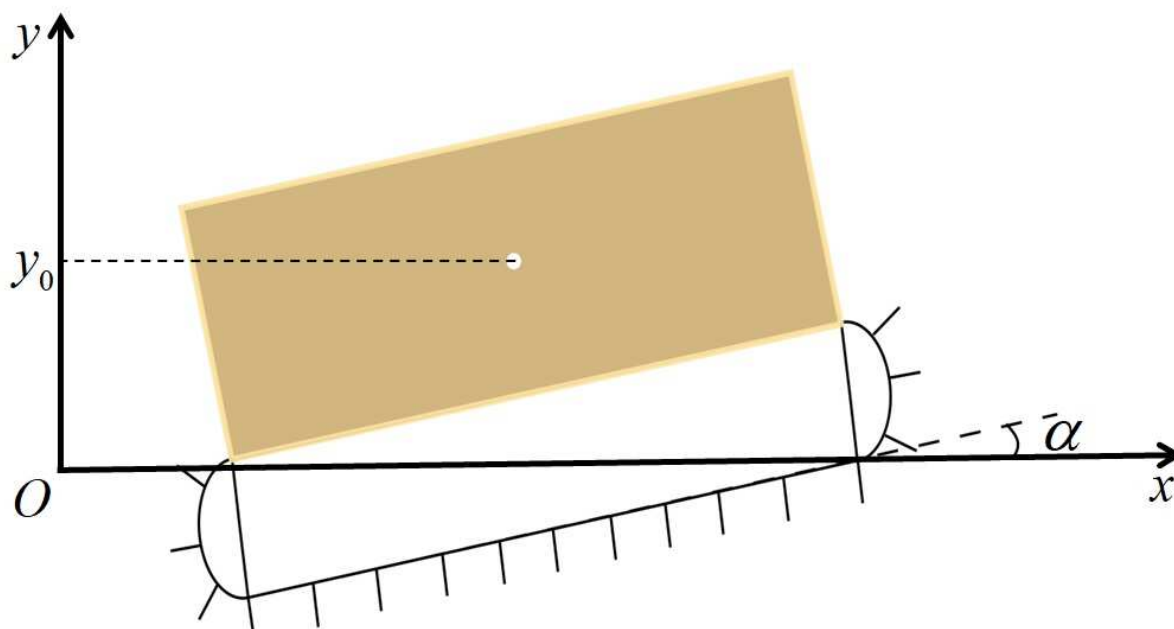


Рис.1.

1. Boyko A.V., Golub A.P., Yeroshin V.A., Samsonov V.A. Hydrodynamics of new high-speed surface system // Journal of Physics: Conference Series. 2020. С. 1-5.
2. Голуб А.П., Бойко А.В., Ерошин В.А., Самсонов В.А. Моделирование сил при движении гусеничного объекта по поверхности воды // XXV Международная научно-техническая конференция "Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика". 2021. С. 56-59.

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИЧНОСТИ ЧАСТИЧНО НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Гончаров М.М., Кондрашов А.Н., Голдобин А.А., Селетков Б.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

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

В проведенном исследовании изучены при различных значениях эксцентриситеты цилиндров конвективные структуры в полости, заполненной несжимаемой жидкостью (Рисунок 1 а). Поверхность внешнего цилиндра находится при фиксированной температуре T_0 , соответствующей температуре окружающей среды. При этом на одной половине внутреннего цилиндра поддерживалась некоторая постоянная температура T_i , другая же половина считалась теплоизолированной. Результаты исследования получены методом конечных элементов в двумерной постановке в приближении Буссинеска.

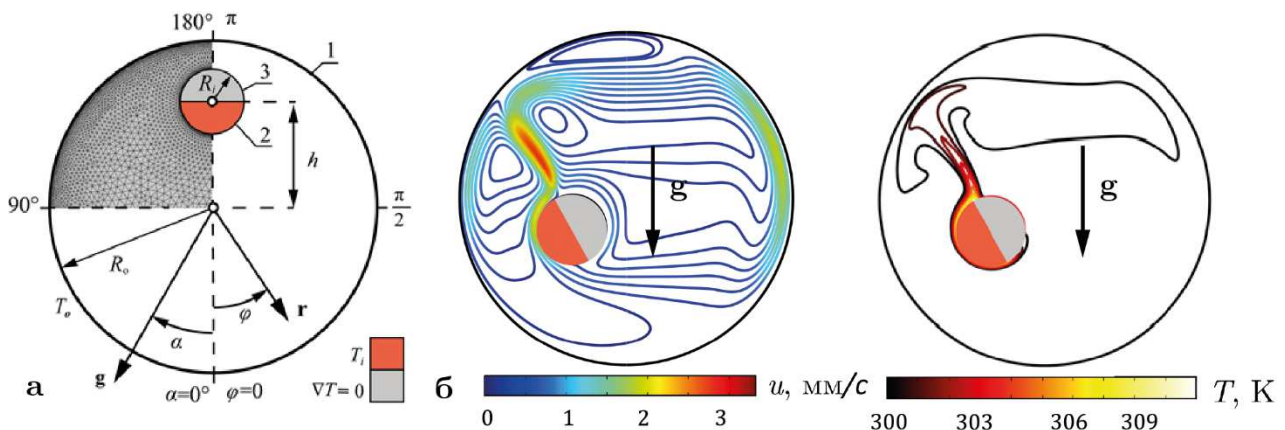


Рисунок 1: Схема расчетной области (а), линии тока и изотермы при угле наклона $\alpha = 120^\circ$, числе Релея $Ra = 2 \cdot 10^6$ и относительном смещении 0.6 (б).

Отмечено, что структура температурного и скоростных полей при смещении на величину меньше половины максимального зазора качественно не отличается от картин, соответствующих случаю коаксиальных цилиндров. При большом смещении изменение угла приводило к существенной смене режима течения, возникающей ввиду близости нагревателя к стенкам. Например, в случае нагрева сверху после достижения некоторого критичного смещения внутреннего цилиндра наблюдалось существование несимметричного решения, что согласуется с результатами работы [1].

Впоследствии зафиксированные особенности ярко проявились в зависимостях интегральных тепловых характеристик. Так, анализируя контурный график безразмерного суммарного теплопотока на внешней границе полости от числа Релея и угла наклона, было замечено варьирование угла с минимальным Нуссельтом от 60° до 100° при различных смещениях нагревателя.

Результаты приведенного исследования могут быть использованы в проектировании электронных систем с компактными источниками тепла в замкнутых полостях [2], а также в системах охлаждения [3].

1. Hu Y. et al. Natural convection in a nanofluid-filled eccentric annulus with constant heat flux wall: A lattice Boltzmann study with immersed boundary method //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2017. – Т. 86. – С. 262-273.

2. Matvey Maksimovich G. et al. Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders //Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.

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

РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНОДИФФУЗИИ ДЛЯ ПОЛОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЦИЛИНДРА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Зверев Н.А.¹, Земсков А.В.^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: nikolayzverev1995@gmail.com

В настоящей работе была рассмотрена одномерная нестационарная полярно-симметричная задача механоdiffузии для ортотропного однородного многокомпонентного полого цилиндра, находящегося под действием механической нагрузки, равномерно распределенной по всей его поверхности. В работе было учтено время релаксации диффузионных процессов, характеризующее конечную скорость распространения диффузионных возмущений.

Математическая постановка поставленной начально-краевой задачи включает в себя [1-2]: линейное неоднородное дифференциальное уравнение движения полого цилиндра, закон сохранения массы в локальной форме, а также N линейных неоднородных дифференциальных уравнений массопереноса, обусловленного наличием диффузии, протекающей внутри цилиндра по вакансионному механизму. Замыкают постановку задачи две пары граничных условий, задаваемых на внешней и внутренней поверхностях цилиндрического тела. Начальные условия принимаются равными нулю, поскольку изначально цилиндр находился в невозмущенном состоянии.

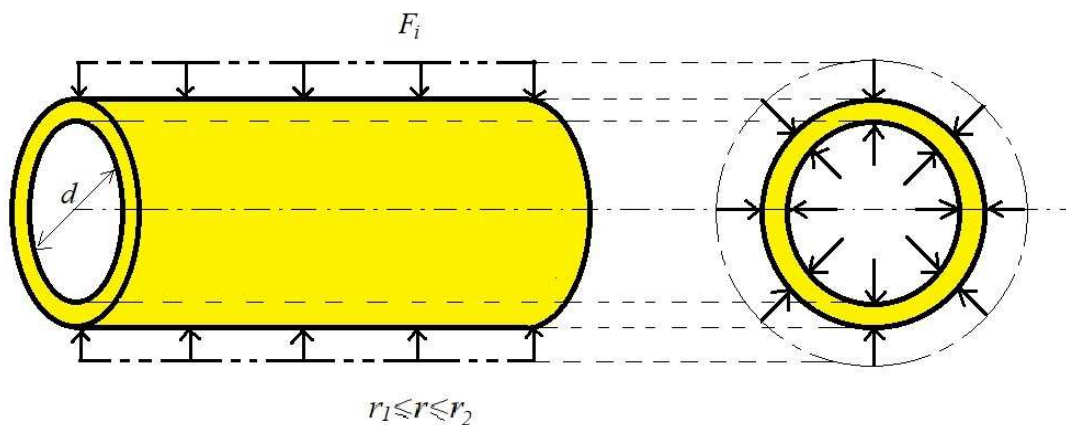


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

Поставленная задача была решена в два этапа.

1. Вначале аналитически была решена вспомогательная задача, отличие которой от исходной заключалось в специальном подборе граничных условий, что позволило найти для нее функции влияния, с помощью представлений искомых функций в виде рядов Фурье по специальным цилиндрическим функциям Бесселя, а также используя интегральное преобразование Лапласа по времени.

2. Из условия того, что решение вспомогательной задачи должно удовлетворять также и граничным условиям исходной задачи, была получена система уравнений, связывающая правые части граничных условий обеих задач. Эти соотношения представляют собой систему интегральных уравнений Вольтерры I рода, которая затем была решена численно. После этого решение исходной задачи было получено путем численного вычисления свертки функций Грина вспомогательной задачи с функциями, определяемыми из вышеуказанной системы интегральных уравнений.

Взаимодействие механического и диффузионного полей было проанализировано и показано на примере трехкомпонентного сплава, состоящего из алюминия, цинка и меди.

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

2. Зверев Н.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарные связанные механоdiffузионные процессы в ортотропном сплошном цилиндре с учетом релаксации диффузионных потоков // Известия высших учебных заведений. Математика. 2021. № 1. С. 25-37.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЫШЕЧНОГО ТОНУСА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Иванова А.Д.¹, Балтин М.Э.¹, Сабирова Д.Э.¹, Балтина Т.В.¹, Саченков О.А.^{1,2}

¹Казанский федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань
e-mail: ivanovaanastasya0449@gmail.com

В работе описано решение задачи управления. В качестве объекта управления была выбрана модель мышечного волокна под действием внешней силы. Задача нейронной сети – найти вид функции управления, чтобы обеспечить сохранение мышц заданного удлинения.

В качестве математической модели мышцы была выбрана трехэлементная модель Хилла. Сокращение мышцы запускает демпфирующий элемент, поэтому управление будет подаваться на него. Изменение длины мышцы инициализирует воздействие на входные сигналы нейрона.

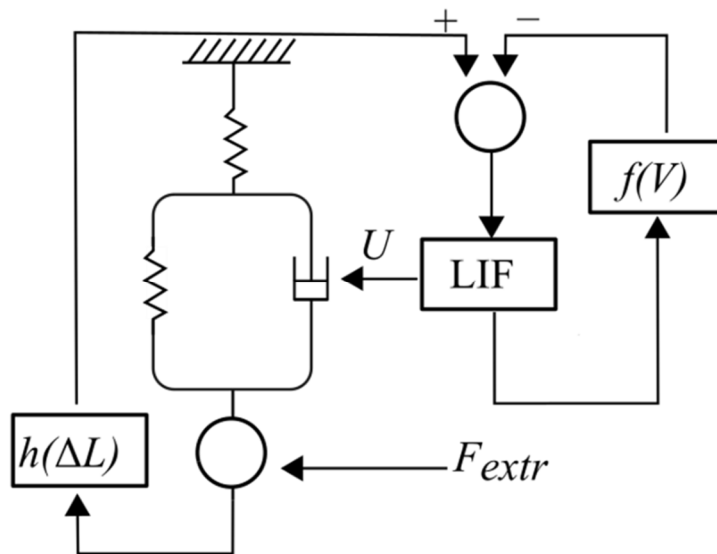


Схема системы управления: F_{extr} – внешняя растягивающая сила, LIF – мотонейрон, U – сила воздействия на сократительный элемент, $h(\Delta L)$ – возбуждающий сигнал мышечной активности, $f(V)$ – тормозящий сигнал нейрона, ΔL – удлинение мышцы.

В результате расчетов было найдено критическое значение, которое можно понимать как параметр бифуркации системы.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-01-00535.

1. Харин Н.В., Иванова А.Д., Туфанова Е.Е., Саченков О.А. Применение нейронных сетей для задач стабилизации динамических систем маятника // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021) Сборник трудов по материалам VII Международной конференции и молодежной школы. – 2021. – 34272 С.

2. Харин, Н.В., Иванова А.Д., Саченков О.А. Применение нейронной сети для стабилизации маятника // Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского. – 2020. – 131-134 С.

3. McCrea D.A., Rybak I.A. Organization of mammalian locomotor rhythm and pattern generation // Brain Research Reviews. – 2008. – 134-146 С.

4. Frigon, A. The neural control of interlimb coordination during mammalian locomotion // Neurophysiol. – 2017. 2224-2241 С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ МАРТЕНСИТНОМ ПРЕВРАЩЕНИИ В СПЛАВЕ $Ti_{49}Ni_{51}$ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Иванов А.М., Беляев Ф.С., Волков А.Е., Беляев С.П., Реснина Н.Н.

Математико-механический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург

e-mail: ileavenovasky@gmail.com

Ранее было обнаружено, что сплавы нестехиометрического состава на основе TiNi при выдержке под постоянной нагрузкой испытывают изотермическое мартенситное превращение, которое сопровождается изменением обратимой деформации. К настоящему моменту, разработанные модели, описывающие функциональное поведение сплавов с памятью формы, не позволяют описать такое anomальное изменение деформации при изотермической выдержке, поскольку в теории исключается возможность образования мартенсита при постоянных температуре и напряжении. Однако в работе [1] была выполнена модификация микроструктурной модели Лихачева-Волкова для описания изменения обратимой деформации при выдержке сплава $TiHfNiCu$ под постоянной нагрузкой. В работе было получено качественное совпадение расчетных и экспериментальных данных, однако количественное соответствие удалось получить не для всех режимов изотермической выдержки. Более того, существующий алгоритм подбора констант микроструктурной модели требует большого количества дополнительных экспериментов и расчетов. Ранее нами был предложен новый метод подбора констант [2] на основе решения оптимизационной задачи методом Нелдера-Мида, который существенно упрощает процедуру подбора констант. В то же время полного теоретического описания изменения изотермической деформации при выдержке сплава $Ti_{49}Ni_{51}$ под различными нагрузками не было проведено. В связи с этим, целью данной работы стало моделирование изменения обратимой деформации при реализации изотермического мартенситного превращения в сплаве $Ti_{49}Ni_{51}$ под различными нагрузками.



Схема алгоритма подбора констант микроструктурной модели.

В настоящей работе подбор констант модели проводили путем минимизации целевой функции, которая количественно описывает разницу между экспериментальными и расчетными данными. Чем ближе целевая функция к нулю, тем ближе по значению расчетные данные к экспериментальным. Оптимизационную задачу решали с помощью известного алгоритма Нелдера-Мида [3]. Подбор констант проводили по набору экспериментальных данных, полученных при выдержке под напряжением 200 МПа. Полученный набор параметров модели использовали для описания экспериментальных результатов, полученных при выдержке под напряжениями 100 и 300 МПа. Обнаружено, что модель качественно и количественно описывает экспериментальные данные. Показано, что модель позволяет предсказать температуру и величину напряжения, при которых наблюдается максимальная изотермическая деформация.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №18-19-00226-П).

1. Demidova, E.S., Belyaev, F.S., Belyaev, S.P., Resnina, N.N., Volkov, A.E. Simulation of isothermal reversible strain in the $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ alloy using a microstructural model. Letters on Materials. 2021. 11(3). 327-331.

2. Иванов, А.М., Беляев, Ф.С., Волков, А.Е., Беляев, С.П., Реснина, Н.Н. Применение метода Нелдера-Мида для оптимизации выбора констант модели Лихачева-Волкова. Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Подана в печать.

3. Nelder, J.A., Mead, R. A simplex method for function minimization. The Computer Journal 1965. 7. 308-313.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКНА ТИПА PANDA НА РАБОТУ УЗЛА

Каменских А.А., Пащенко М.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru, vmm@pstu.ru

Оптические волокна являются важным элементом гироскопов и датчиков разного назначения [1-2]. Исследования их поведения при широком диапазоне рабочих температур, контакте с металлическими и неметаллическими поверхностями и разного вида нагрузок является актуальным с точки зрения технологических задач прикладной механики.

Представляет интерес влияния характера сопряжения элементов оптического волокна типа Panda с учетом многослойного защитно-упрочняющего полимерного покрытия (ЗУП) на деформационные и оптические характеристики объекта исследования. Рассмотрено моделирование контакта волоконно-оптических волноводов и алюминиевого полупространства (рис. 1). Модель приближена к промежуточному технологическому испытанию.

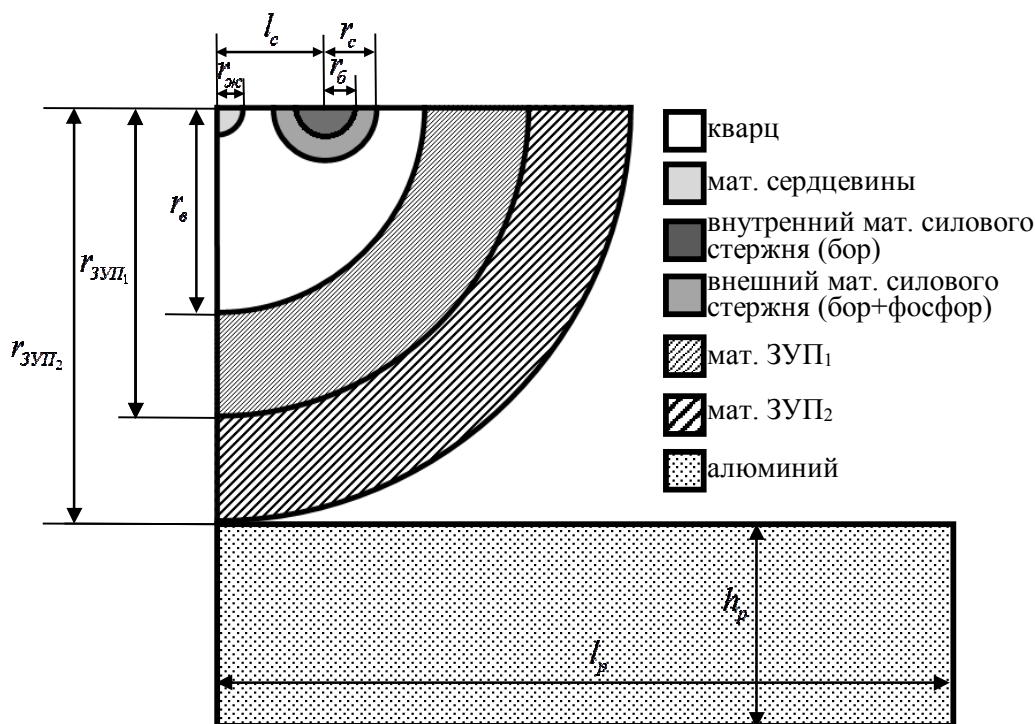


Рис. 1. Расчетная схема контакт волокна с ЗУП и полупространства.

В работе рассмотрено четыре варианта характера сопряжения элементов волокна. Взаимодействие волокно-полупространство моделируется с учетом контакта. Задача рассматривается как модельная с учетом силы индентирования. Установлены качественные и количественные закономерности изменения параметров деформирования и оптики при диапазоне нагрузок от 0,05 до 0,5 Н.

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

1. Лесникова Ю.И. Анализ влияния двухслойного защитно-упрочняющего покрытия на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 49-61.

2. Лесникова Ю.И., Труфанов А.Н., Сметанников О.Ю. Исследование оптико-механических характеристик волокна в условиях термоцикла // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 6(2)(86). – С. 255-260.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗУБА С КЛИНОВИДНЫМ ДЕФЕКТОМ ДО И ПОСЛЕ РЕСТАВРАЦИИ

Каменских А.А., Носов Ю.О., Седельникова С.С., Сахабутдинова Л.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru, ura.4132@yandex.ru, vmm@pstu.ru

Клиновидный дефект является достаточно распространенным заболеванием зубочелюстной системы в мире [1, 2]. Представляет интерес влияние геометрии клиновидного дефекта [3]: формы (U и V-образная), глубины, положения и т.д. В работе рассмотрено влияние геометрии клиновидного дефекта разной формы и глубины на напряженно-деформированное состояние зуба. На рис. 1 для примера представлено центральное сечение зуба с клиновидным дефектом U-образной формы.

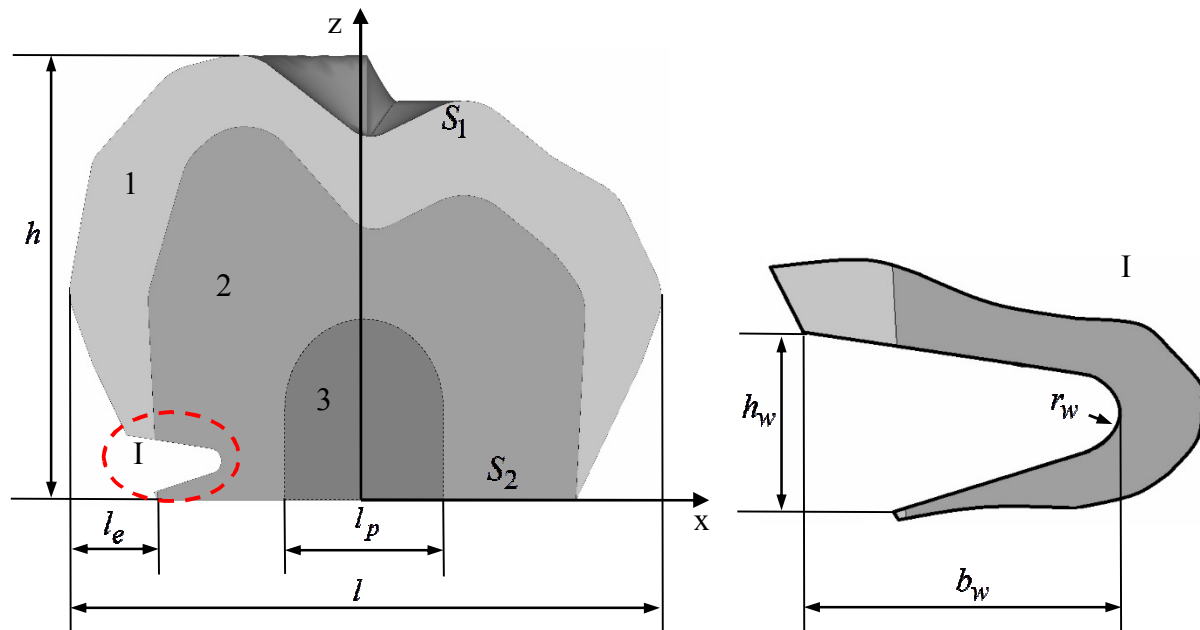


Рис. 1. Центральное сечение зуба с клиновидным дефектом.

Рассмотрено деформирование зуба с клиновидным дефектом до и после реставрации композиционными материалами нагрузками от 100 до 1000 кН. Зуб моделируется с учетом эмали и дентина, пульпа зуба не моделируется. Пульпа зуба учитывается при ограничении глубины клиновидного дефекта. Не рассматриваются клиновидные дефекты, затрагивающие пульпу зуба. Материалы реставрации: Herculite XRV – универсальный микрогибридный композиционный материал; Charisma – рентгеноконтрастный композитный материал на основе стекла.

Выполнено создание автоматизированного параметризованного алгоритма для построения, решения и обработки результатов исследования. Установлено значительное увеличение напряжений и деформаций в области клиновидного дефекта при действии нагрузки от зуба антагониста и получены их зависимости от нагрузки. При реставрации клиновидного дефекта рассматривается сопряжение зуб-вкладка в рамках контактной склейки. Установлены зависимости деформационных и контактных характеристик от материалов реставрации и геометрии клиновидного дефекта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Пермского национального исследовательского политехнического университета в рамках федеральной программы академического лидерства «Приоритет-2030».

1. Sarode G., Sarode S. Abfraction: A review // Journal of Oral and Maxillofacial Pathology: JOMFP. – 2013. – Vol. 17. – P. 222-227.

2. Elmarakby A., Sabri F., Alharbi S., Halawani S. Noncarious Cervical Lesions as Abfraction: Etiology, Diagnosis, and Treatment Modalities of Lesions: A Review Article // Dentistry. – 2017. – Vol. 07. – Art. 1000438.

3. Noda N.-A., Chen K.-K., Tajima K., Takase Y., Yamaguch K., Nagano H. Intensity of Singular Stress Field due to Wedge-Shaped Defect in Human Tooth after Restored with Composite Resins // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A. – 2009. – Vol. 75. – P. 1209-1216.

О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: ulesig@gmail.com, ant@pstu.ru, anna_kamenskih@mail.ru

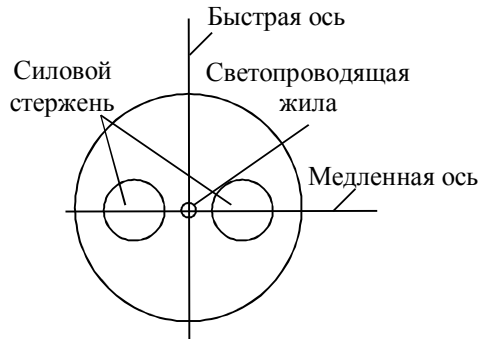


Рис. 1 Схема поперечного сечения волокна.

В рамках работы выполнено моделирование оптического волокна типа Panda (рис. 1) с учетом гетерогенных свойств конструктивных элементов, двухслойного защитно-упрочняющего покрытия и контактного взаимодействия без трения с алюминиевой катушкой в рамках технологической пробы в широком диапазоне температур от -60 до $+60^\circ\text{C}$. Такое волокно используют в чувствительных элементах волоконно-оптических гироскопов.

В конструкцию волокна включают симметрично светопроводящей жиле два специальных силовых стержня с отличным от остального материала коэффициентом

температурного расширения. Во время вытяжки волокна из-за несовместности деформаций формируются температурные остаточные напряжения, которые в силу фотоупругих эффектов создают условия поддержания поляризации светового сигнала в светопроводящей жиле. Температурная природа анизотропии остаточных напряжений в светопроводящей жиле приводит к достаточно сильной зависимости величин оптических характеристик волокна от температуры [1].

В рамках серии численных экспериментов выполнено исследование влияния термосилового воздействия на напряженно-деформированное состояние и оптические характеристики волокна типа Panda. Вследствие воздействия температуры, изгиба, контактных напряжений и натяжения волокна показатель преломления светопроводящей жилы снижается относительно волокна в спокойном состоянии. На рис. 2 приведен профиль отклонения показателя преломления, который реализуется в светопроводящей жиле на разных этапах термоцикла. По медленной оси происходят большие изменения показателя преломления. Качественно профиль показателя преломления соответствует случаям, описанным в литературе [2].

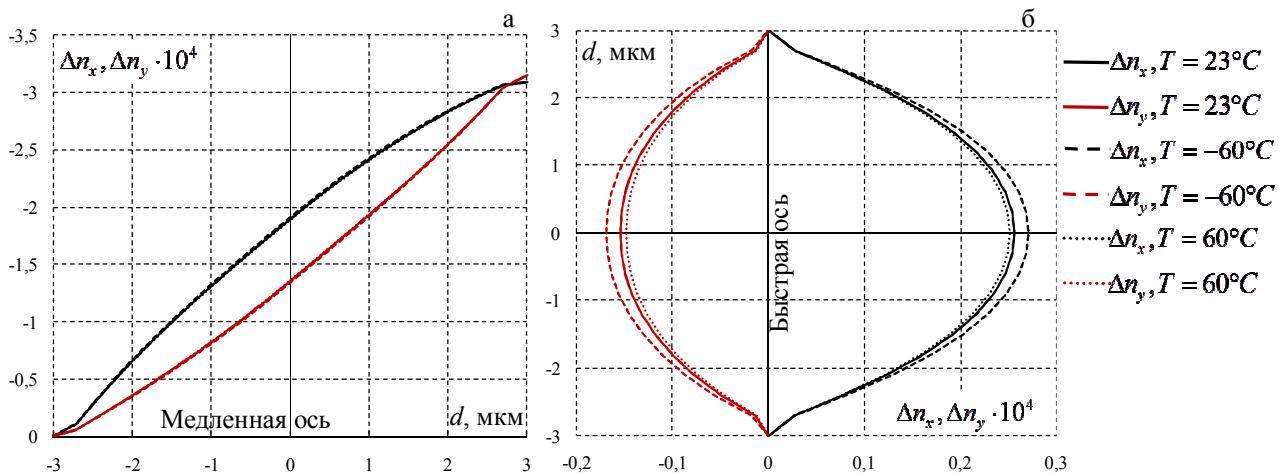


Рис. 2. Профили отклонения показателя преломления в условиях термоцикла:
а) по медленной оси волокна, б) по быстрой оси волокна.

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

1. Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А., Селянинов Ю.А. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т.58, №12. С. 978-984.

2. Черненко В.Д. Оптомеханика волоконных световодов: Учебное пособие /В.Д. Черненко. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.

ДИНАМИКА УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИНИЦИИРОВАННИИ СКОЛЬЗЯЩИХ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ РАЗРЯДОВ

Знаменская И. А., Карнозова Е. А., Руденко С.
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: Liza.Karnozova@yandex.ru

Перспективной областью применения разрядов различных типов (плазменных актуаторов) является управление высокоскоростными газодинамическими потоками как в камерах сгорания летательных аппаратов, так и на обтекаемых поверхностях.

В работе исследована динамика ударно-волновых полей (теневая высокоскоростная съемка), и тепловых полей на стенках рабочей камеры ударной трубы (инфракрасная термография) инициированных двумя типами разрядов.

1. Разряд, скользящий по поверхности диэлектрика вблизи диэлектрической вставки на горизонтальной поверхности плазменного листа; длина 30 мм.
2. Вертикальный колоннообразный разряд вблизи окна разрядной камеры высотой 24 мм (режим контракции объемного разряда).

Регистрация велась через кварцевые окна рабочей камеры ударной трубы.

Теневая высокоскоростная съемка позволила зарегистрировать цилиндрические ударные волны от области импульсного линейного энерговклада вблизи вертикальных и горизонтальных стенок, измерить скорость [1].

Получены последовательные изображения инфракрасных полей, нагретых разрядами наносекундной длительности стенок камеры, исследовано время релаксации теплового излучения стенок вблизи диэлектрической вставки в форме прямоугольного параллелепипеда размером $6 \times 2 \times 48$ мм³. Показано, что время остывания области текстолитовой стенки, нагретой плазмой, может длиться до 30 мс и существенно превышает время остывания кварцевой стенки (до 4 мс).

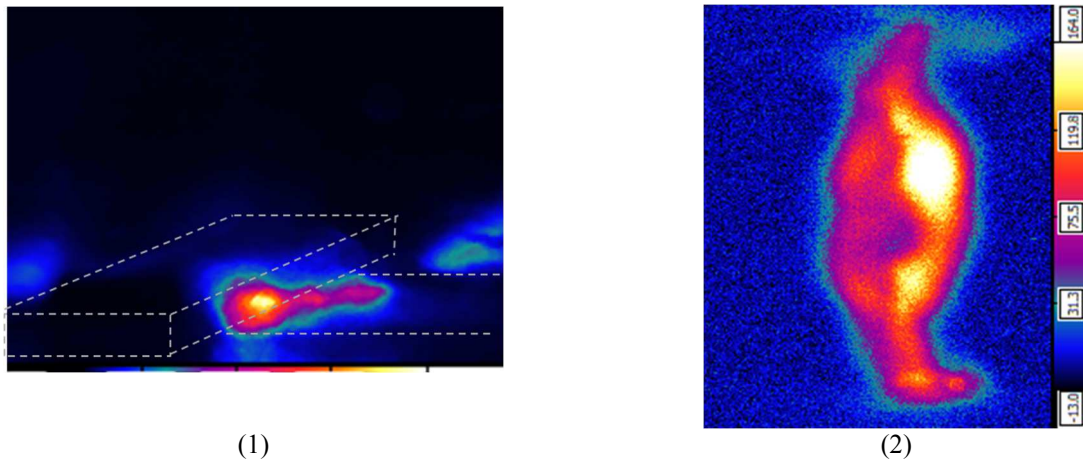


Рис. 1. Инфракрасная съемка нагретой нижней стенки (1) и окна камеры (2).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-29-00652.

1. Tatarenkova D.I., Koroteeva E.Y., 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. № 7. P. 151. DOI: 10.1007/s00348-021-03253-0.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ КРЫЛА ПУТЕМ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В КОНЦЕВОМ ВИХРЕ ПРАНДТЛЯ

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

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

Традиционным путем экспериментального получения аэродинамических характеристик в аэродинамической трубе любых объектов, обтекаемых потоком, является применение весовых приборов различного типа. Вместе с тем в случае крыла существует феноменологическая возможность получения величины подъемной силы, обусловленная однозначным ее соответствием циркуляции концевого вихря Прандтля, которая определяется как интеграл от скорости в поперечном сечении вихря по замкнутому контуру, охватывающему ось вихря. Однако сложность применения традиционных измерительных технологий (аэро-, термоанемометрия) для такого течения практически исключает реализацию концепции настоящей работы.

Вместе с тем применение оптических методов для этой цели представляется вполне реальным. Так в настоящей работе была применена технология ВВИС ЦАГИ – визуализационно-видеографический способ измерения скорости, – состоящая в покадровой расшифровке скоростной видеофиксации течения, засеянного микрочастицами в постоянном лазерном освещении [1]. В качестве объекта исследования было избрано прямоугольное крыло (хорда $b=240$ мм, размах 1200 мм, $\lambda=5$) с профилем CLARK-YH12.

Испытательным стендом являлся ГСС – гидростенд скоростной необращенного движения (в варианте с "сухим дном"). На этом стенде модель размещается на подвижной тележке с устройством изменения угла атаки модели α (скорость V – до 30 м/с) и движется внутри прямолинейного канала $2 \times 2 \times 60$ м. В контрольном участке канала размещается мобильный комплекс 2D-ВВИС ЦАГИ, осуществляющий скоростную видеосъемку течения в любом избранном поперечном сечении вихря, экспонирующимся по мере пролета крыла.

Пример обработки видеокартинки течения ($V=7$ м/с, $\alpha=5^\circ$) на окружностях радиуса $R=60, 45$ и 32 мм демонстрирует величины азимутальных скоростей $v_\theta=1.0, 1.46$ и 2.14 , что соответствует, принимая во внимание очевидное соотношение

$$C_y = 4 \pi R v_\theta / b V,$$

величинам $C_y = 0.46, 0.49$ и 0.51 или $C_y=0.48$ в среднем. Канонизированные экспериментальные данные ЦАГИ ("Атлас аэродинамических характеристик профилей крыльев") для прямого крыла $\lambda = 5$ с профилями CLARK-YH11 и YH14 при $\alpha = 5^\circ$ составляют $C_y = 0.45$ и 0.5 , что можно квалифицировать как практическое совпадение с полученной величиной. Подобная ситуация соответствует и зависимости $C_y(\alpha)$ в диапазоне углов атаки безотрывного обтекания. Помимо этих данных методика наглядно демонстрирует структуру течения в вихре с четко обозначенным ядром твердотельного вращения около оси и азимутальной неустойчивостью границы вихря в виде нелинейных волн.

Подобный подход может оказаться эффективным в случае невозможности осуществления контактных способов измерения нагрузок.

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

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ С УЧЁТОМ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ

Кильдибаева С.Р., Суяргулова Э.Э., Харисов Э.И.

¹Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, Стерлитамак

e-mail: freya.13@mail.ru

Исследование особенностей течения многофазных затопленных струй представляет большой интерес в связи с возможными разливами углеводородов при разработке глубоководных месторождений. Известные на сегодняшний момент случаи разливов в Мексиканском заливе и Северном море подтверждают актуальность исследуемой темы. Для прогнозирования поведения затопленной струи необходимо разработать математическую модель течения струи, учитывающую ряд основополагающих факторов: взаимодействие компонентов струи, наличие гидратообразования, действие подводного течения на динамику течения струи и т.д. Течение затопленной струи включает 3 этапа: затопленная струя (jet), плавучий шлейф (plume), стадия адвекции-диффузии, которая наступает после достижения струи нейтрального уровня плавучести. Комплексное исследование затопленных струй позволит уменьшить время ликвидации утечки и провести оценку объемов нефти, которые могут достигнуть поверхности водоема.

В работе рассмотрена математическая модель течения многофазной затопленной струи для двух начальных этапов течения струи с учётом гидратообразования. Для описания динамики течения струи рассматривается метод ИЛМКО, дополненный уравнениями, соответствующими особенностям течения струи и гидратообразования.

Согласно лабораторным исследованиям, посвященным образованию гидратов, не вся поверхность газового пузырька будет способна покрываться гидратной оболочкой [1]. В этом случае ключевую роль будет играть состав водонефтяной эмульсии. Ранее в работах [2-3] образование гидрата рассматривалось на всей поверхности пузырька, так как не учитывалось взаимодействие газового пузырька с окружающей нефтью. В данной работе рассмотрен случай частичного образования гидрата на поверхности пузырька.

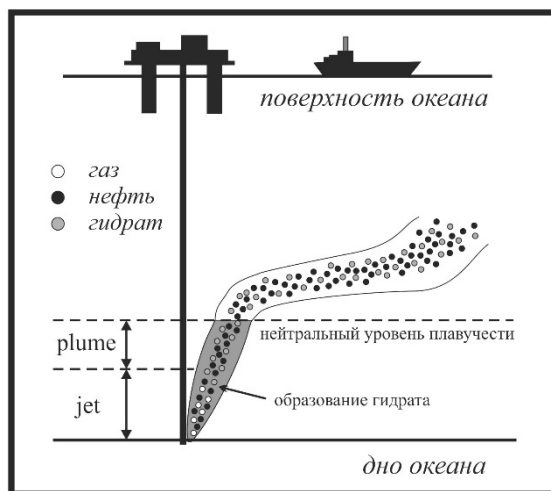


Рис. Схема этапов течения многофазной затопленной струи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10227, <https://rscf.ru/project/21-79-10227/>.

1. Корякина В.В., Шиц Е.Ю. Модель Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами в исследовании кинетики образования гидрата природного газа в обратных эмульсиях нефти //Конденсированные среды и межфазные границы. 2020. 22(3). С.327-335.

2. Кильдибаева С. Р., Гималтдинов И. К. Эволюция нефтегазовой струи, истекающей через разрыв магистрального нефтепровода (газопровода), расположенного на дне водоема. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 5. С. 193–200.

3. Кильдибаева С.Р. , Гималтдинов И.К. Математическая модель затопленной струи с учётом влияния 3D течения окружающей воды. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2019. Т. 12. № 1. С. 137-143.

КВАЗИГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

Кiryushina M.A.
ИПМ РАН им. М.В. Келдыша, Москва
e-mail: m_ist@mail.ru

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

Одним из методов численного моделирования задач газовой динамики является использование квазигазодинамических уравнений, которые являются обобщением уравнений Навье-Стокса. Такой регуляризованный подход имеет широкий спектр практического применения, а также большой исследовательский потенциал.

Моделирование сверхзвукового течения газа рассматривается на примере решения тестовой задачи о нестационарном взаимодействии вихревого течения с ударной волной. Данная задача решена с помощью КГД численного алгоритма – решателя **QGDFoam**, построенного на базе квазигазодинамических уравнений и включенного в открытый комплекс OpenFOAM. Результаты расчета сравниваются с другими вычислительными ядрами, вариантами метода Курганова–Тадмора, включенные в состав открытого программного комплекса OpenFOAM. Также результаты сравниваются с опубликованными данными, полученными на основе метода типа Годунова высокого порядка точности.

В итоге получается, что КГД алгоритм успешно решает поставленную задачу, результаты расчетов монотонно сходятся к решению, рассматриваемому в качестве эталонного, при сгущении пространственной сетки. При малых значениях диссипативных коэффициентов результаты КГД расчетов близки к результатам, полученным по схеме второго порядка точности, а при больших значениях – к результатам расчетов по схеме первого порядка точности с направленными разностями. Достаточно простая регулировка диссипативных коэффициентов в КГД алгоритме позволяет настраивать его для получения решения с нужной точностью.

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

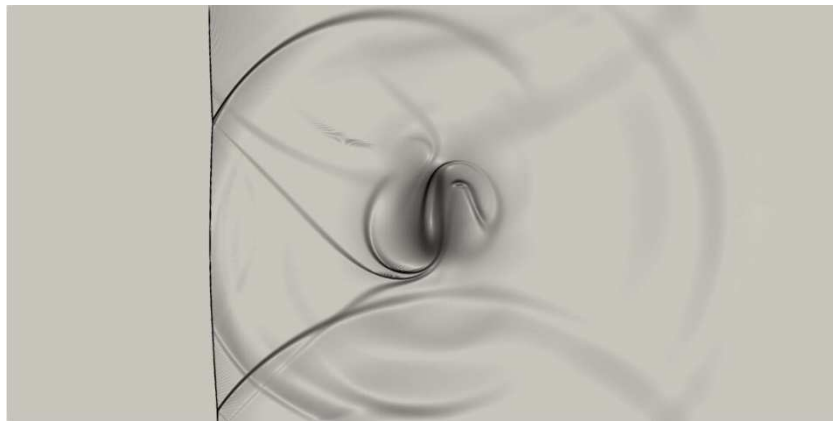


Рис. 1. Расчет на сетке 2400*4800.

1. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Москва, Научный мир, 2007.
2. M.V. Kraposhin, D.A. Ryazanov, E.V. Smirnova, T.G. Elizarova, M.A. Kiryushina (Istomina) // Development of OpenFOAM solver for compressible viscous flows simulation using quasi-gas dynamic equations. DOI: [10.1109/ISPRAS.2017.00026](https://doi.org/10.1109/ISPRAS.2017.00026).
3. Rodionov A.V. Simplified artificial viscosity approach for curing the shock instability // Computers and Fluids. 219 (2021). 104873.

АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ НЕЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ ВО ВНЕШНЕМ ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Колбнева Н.Ю.

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль
Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Ярославль
e-mail: kolbneva-nata@yandex.ru

Исследование акустического излучения, генерируемого капиллярными осцилляциями капель во внешней сжимаемой среде, представляет интерес в связи с проблемами акустического зондирования облаков и туманов, акустической левитации капель в современных технологиях получения высокочистых веществ.

Исходя из закона сохранения энергии, в идеализированной модели идеальной жидкости невязкое затухание может быть связано только с потерями энергии осцилляций на излучение звуковых и электромагнитных (при наличии собственного или индуцированных внешним электрическим полем зарядов) волн.

В настоящей работе выполнен нелинейный аналитический асимптотический расчет капиллярных осцилляций незаряженной капли идеальной несжимаемой идеально проводящей жидкости во внешнем однородном электростатическом поле и интенсивности монопольного и дипольного акустических излучений в квадратичном приближении по величине безразмерной амплитуды осцилляций ϵ .

Математическая модель задачи включает основные уравнения электрогидродинамики с граничными условиями. Введены дополнительные интегральные условия: сохранения объема капли, неподвижности её центра масс и условие незаряженности капли. Показано, что наличие внешнего электростатического поля приводит к вытягиванию равновесной формы капли в сфероид.

Решение поставленной нелинейной задачи проведено в рамках метода многих временных масштабов. Принято, что квадрат эксцентриситета e^2 капли сравним по величине с безразмерной амплитудой осцилляций капли: $e^2 \sim \epsilon$. Ограничиваясь точностью до второго порядка малости по ϵ , расчеты задачи выполнены с сохранением слагаемых, учитывающих как взаимодействие возбужденных колебательных мод со стационарной деформацией капли, так и взаимодействие возбужденных колебательных мод между собой.

В электрогидродинамических расчетах первого и второго порядков малости по ϵ найдены последовательные поправки к возмущению поверхности капли. Показано, что наличие в спектре капиллярных осцилляций амплитуды нулевой моды превращает каплю в акустический излучатель монопольного типа, а наличие амплитуды первой моды превращает каплю в источник звукового излучения дипольного типа. Показано, что монопольная компонента акустического излучения вносит существенный вклад в интегральную интенсивность излучения.

1. Григорьев А.И., Колбнева Н.Ю., Ширяева С.О. Капиллярные волны и дипольное электромагнитное излучение, создаваемое нелинейными осцилляциями незаряженной капли во внешнем однородном электростатическом поле // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84. № 2. С. 141-163.

2. Григорьев А.И., Колбнева Н.Ю., Ширяева С.О. Дипольное электромагнитное излучение заряженной капли, осциллирующей в однородном электростатическом поле // Изв. РАН. МЖГ. 2018. №2. С. 62-76.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

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

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

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

e-mail: cozlov.maks@mail.ru

Краевой угол смачивания является одним из определяющих параметров в различных технологических процессах, например, при разделении руды в процессе флотации [1]. Ранее в литературе, был описан процесс изменения краевого угла смачивания за счет добавления в жидкости поверхностно-активных веществ [2]. Также исследовались вопросы связанные с влиянием шероховатости твёрдой поверхности на краевой угол смачивания [3]. В последнее десятилетие, активно исследуется вопрос применения УЗ воздействия на процесс флотации, с целью повышения его эффективности [4]. Однако, вопрос, посвященный влиянию УЗ на краевой угол смачивания, остается до сих пор открытым. Настоящая работа посвящается исследованию влияния УЗ воздействия на процесс взаимодействия воздушного пузырька с твёрдыми поверхностями различной степени гидрофобности.

В настоящей работе, краевой угол смачивания измерялся методом пленённого пузырька (captive bubble) на твердой поверхности, горизонтально закреплённой над источником УЗ воздействия. Подложка располагалась на высоте 15 см над источником УЗ мощностью $P = 30$ Вт и частотой $f = 28$ КГц (рис.1 а). Эксперименты показали, что краевой угол смачивания изменяется в результате УЗ воздействия. На подложке из аморфного кварца, в отсутствие УЗ воздействия он составлял $131^\circ \pm 3^\circ$ (рис.1 б), а при наличии УЗ воздействия с указанными параметрами уменьшался до $115^\circ \pm 5^\circ$ (рис.1 в). Причиной изменения краевого угла смачивания является вибрационная сила, возникающая в результате УЗ воздействия на жидкость.

Таким образом, УЗ воздействие приводит к изменению краевого угла смачивания, что может влиять на процесс прикрепления твердых частиц руды к пузырькам. В дальнейшем планируется исследовать влияние УЗ на краевой угол смачивания в гетерогенных системах с различными физико-химическими свойствами.

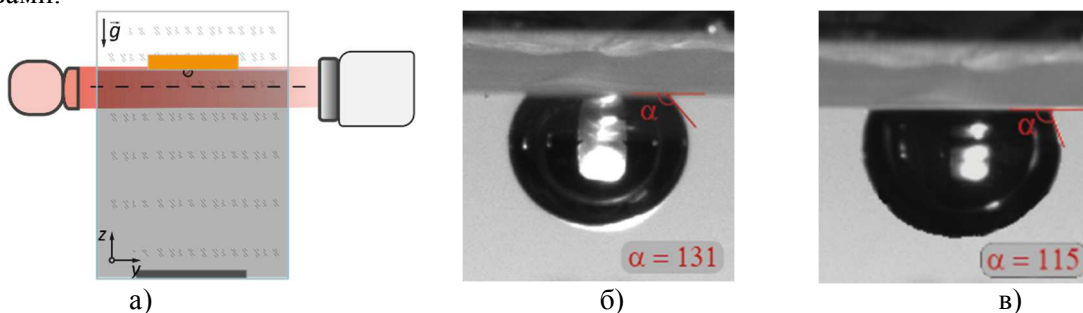


Рис 1. Измерение краевого угла смачивания для газового пузырька: а) экспериментальная установка; б) в воде; в) в воде при наличии УЗ воздействия.

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

1. Ozdemir, O., Karaguzel, C., Nguyen, A. V., Celik, M. S., & Miller, J. D. (2009). Contact angle and bubble attachment studies in the flotation of trona and other soluble carbonate salts. *Minerals Engineering*, 22(2), 168-175.

2. Ketola, A. E., Xiang, W., Hjelt, T., Pajari, H., Tammelin, T., Rojas, O. J., & Ketoja, J. A. (2020). Bubble Attachment to Cellulose and Silica Surfaces of Varied Surface Energies: Wetting Transition and Implications in Foam Forming. *Langmuir*, 36(26), 7296-7308.

3. Hassas, B. V., Caliskan, H., Guven, O., Karakas, F., Cinar, M., & Celik, M. S. Effect of roughness and shape factor on flotation characteristics of glass beads. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 492, 88-99 (2016).

4. Lyubimova, T. P., Rybkin, K. A., Fattalov, O. O., Kuchinskiy, M. O., Kozlov, M. V., & Kugaevskaya, A. A. (2021, February). On the mechanism of selective fixation of bubbles under the action of ultrasound in NaCl and KCl solutions during degassing. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1809, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СО СМЕШАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСЧЁТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Краснопольский Б.И.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: krasnopolsky@imec.msu.ru

Современное развитие архитектуры вычислительных систем во многом определяется особенностями и требованиями задач искусственного интеллекта. В частности, существенный акцент делается на ускорении матричных операций и вычислениях с пониженной точностью. Данные тенденции, однако, явным образом не связаны с актуальными потребностями при моделировании задач механики сплошных сред, и в частности, расчёте гидродинамических течений. Как следствие, эти возможности вычислительных систем оказываются невостребованными в задачах математического моделирования.

В настоящем докладе обсуждаются возможности использования смешанной точности вычислений для решения систем линейных алгебраических уравнений – наиболее трудозатратной части расчётов течений несжимаемой жидкости. Рассматривается несколько различных алгоритмических подходов к организации вычислений со смешанной точностью (часть вычислений выполняется с исходной двойной точностью, и часть с одинарной), позволяющих, с одной стороны, получить итоговый результат с требуемой точностью, а с другой – существенную долю вычислений проводить с пониженной точностью. Соответствующие алгоритмы реализованы в составе библиотеки численных методов решения систем линейных алгебраических уравнений и исследованы на ряде типовых задач моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости. Показано, что алгоритм итерационного уточнения решения с учётом ряда предложенных критериев позволяет без потери итоговой точности ускорить решение систем линейных алгебраических уравнений в 1.6-1.7 раза. Аналогичные исследования в рамках прямого численного моделирования турбулентных течений (в качестве тестовой рассмотрена задача расчёта течения при обтекании массива кубов на стенке плоского канала) продемонстрировали ускорение расчётов в 1.5 раза.

Работа поддержана грантом РНФ 18-71-10075.

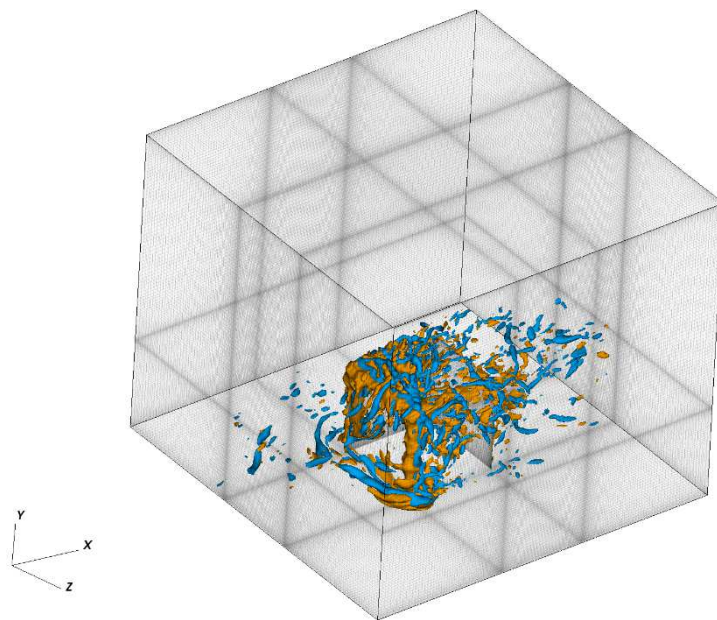


Рис. Визуализация Q-критерия при обтекании турбулентным потоком куба, расположенного на стенке плоского канала.

1. Krasnopolsky B., Medvedev A. Evaluating performance of mixed precision linear solvers with iterative refinement // Supercomputing Frontiers and Innovations, vol. 8(3), p. 4-16, 2021.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ В УСЛОВИЯХ АНИЗОТРОПИИ

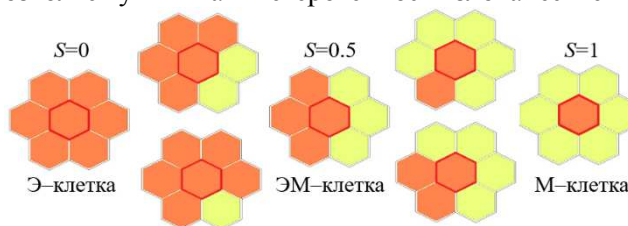
Красняков И.В., Браун Д.А.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра «Прикладная физика», Пермь
e-mail: krasnyakov_ivan@mail.ru

Результаты исследований последних лет говорят о том, что опухоль не является однородным скоплением деградировавших клеток, которое расширяется за счёт неконтролируемой пролиферации. Скорее опухоль представляет собой своеобразный орган (или даже организм), который живёт по собственным законам. Программой в этом смысле является обзорная статья [1], в которой подчеркивается гетерогенный характер опухоли. Внутри опухоли происходит дифференциация клеток по группам, которые выполняют определённые специфические функции. Как выяснилось, раковые клетки взаимодействуют не только друг с другом, но и со своим микроокружением. В результате такого взаимодействия раковые клетки могут образовывать различные структуры как инвазивного, так и не инвазивного типа [2], которые помогают опухоли коллективно защищаться от различного рода терапий, а также повышают потенциал к метастазированию.

Что же касается математического моделирования процессов возникновения и роста злокачественных образований в живом организме, то это направление является одним из актуальных и важных в медицинской биологии. Результаты, получаемые в рамках моделирования, могут существенно помочь лучшему пониманию протекания процессов с фундаментальной точки зрения, а также дать практическую поддержку приложениям, например, в биомедицине. На сегодня существует большое количество работ, посвящённых математическому моделированию роста карциномы, но большинство этих работ не учитывает гетерогенность как самого злокачественного образования, так и его микроокружения.

При разработке математической модели мы используем дискретный подход к моделированию, основанный на модели деформируемой клетки с индивидуальной динамикой. Основные положения, которые используются при построении математической модели заложены в работе [3]. Так в работе [3] нами был исследован рост гетерогенной инвазивной карциномы в эпителиальной ткани при однородных условиях микроокружения. Гетерогенность опухоли в модели достигается введением функции, описывающей фенотип (тип поведения) клетки. Таким образом, мы получаем набор состояний фенотипа клетки, представленный на рисунке, который может меняться динамически. Введение такой функции позволяет учитывать гетерогенность злокачественного образования.



Изображение, иллюстрирующее набор фенотипов клетки в математической модели.

В данной работе мы продолжаем развивать разработанную хемомеханическую математическую модель роста гетерогенной инвазивной карциномы, на случай роста гетерогенной инвазивной карциномы в неоднородной среде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-31-90024).

1. Tabassum D.P., Polyak K. Tumorigenesis: it takes a village. // Nat. Rev. Cancer., 2015. Vol. 8. P. 473-483.
2. Крахмаль Н.В., Завьялова М.В., Денисов Е.В., Вторушин С.В., Перельмутер В.М. Инвазия опухолевых эпителиальных клеток: механизмы и проявления // Acta Naturae. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 18-31.
3. Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Pismen L.M. Biomechanical modeling of invasive breast carcinoma under a dynamic change in cell phenotype: collective migration of large groups of cells // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. – 2020. – Vol. 19. – P. 723-743.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ И ИХ АГЛОМЕРАТОВ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

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

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

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

e-mail: kat6chinskiy@gmail.com

Во многих промышленных процессах металлургической, химической, обогатительной промышленности используются воздушные пузырьки. Их количество и размеры являются немаловажным параметром в технологических циклах [1]. Для управления размерами образуемых пузырьков инженеры-технологи используют различные методы [2], однако существует ряд проблем, связанных со стабилизацией поверхности пузырьков и предотвращения их коалесценции, зачастую это решается путем добавления ПАВ. Наличие внешнего ультразвукового воздействия в таких задачах, способно значительно повлиять на динамику взаимодействия пузырьков. Цель настоящей работы состоит в исследовании генерации воздушных включений модифицированным мембранным методом, при наличии внешнего ультразвукового воздействия различной частоты.

В ходе экспериментального исследования использовалась кювета (рис.1) в форме параллелепипеда с внутренними размерами 235×240×35 мм³. Генерация пузырьков осуществлялась с использованием мелкодисперсной кварцевой мембраны, воздушного компрессора и водяного погружного насоса. Источник ультразвука располагался вблизи области 6 (рис.1). Регистрация воздушных пузырьков осуществлялась при помощи камеры Basler acA1920-155um и коллимированного источника контрольного света. Минимальный диаметр регистрируемого пузырька составлял - 32 мкм.

Эксперименты показали, что при увеличении концентрации SDS происходит рост объёмной концентрации пузырьков в растворе, при этом средний диаметр образуемых пузырьков уменьшается. Внешнее ультразвуковое воздействие вызывает образование кластеров, состоящих из пузырьков определенного диаметра.

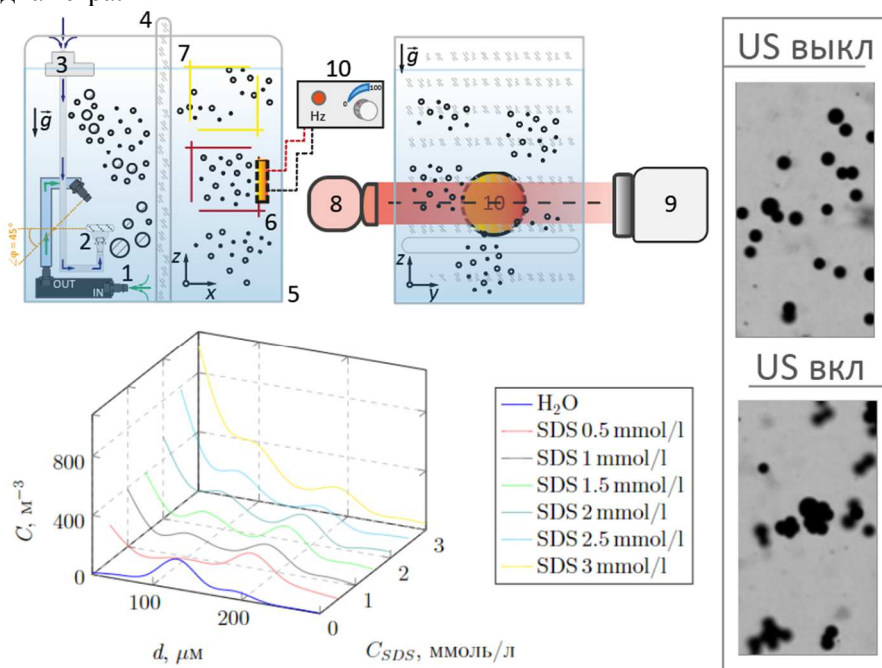


Рис.1. Схема экспериментальной установки, гистограммы распределения пузырьков по диаметру для разных концентраций SDS, фотографии генерируемых пузырьков.

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

1. Sirikulchaikij, S., Nooklay, B., и др. Rubber foam processing via bubbling technique // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd. 2019. T.962. С. 96-100.

2. Yang, H. C., Hou, J. и др. Janus membranes with asymmetric wettability for fine bubble aeration // Advanced Materials Interfaces. 2016. T.3 . №. 9. С. 1500774.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСУДИСТОГО АНАСТОМОЗОС НА ОСНОВЕ 0-D и 1-D ГЕМОДИНАМИКИ

Куянова Ю.О.¹, Дубовой А.В.², Бервицкий А.В.², Паршин Д.В.¹

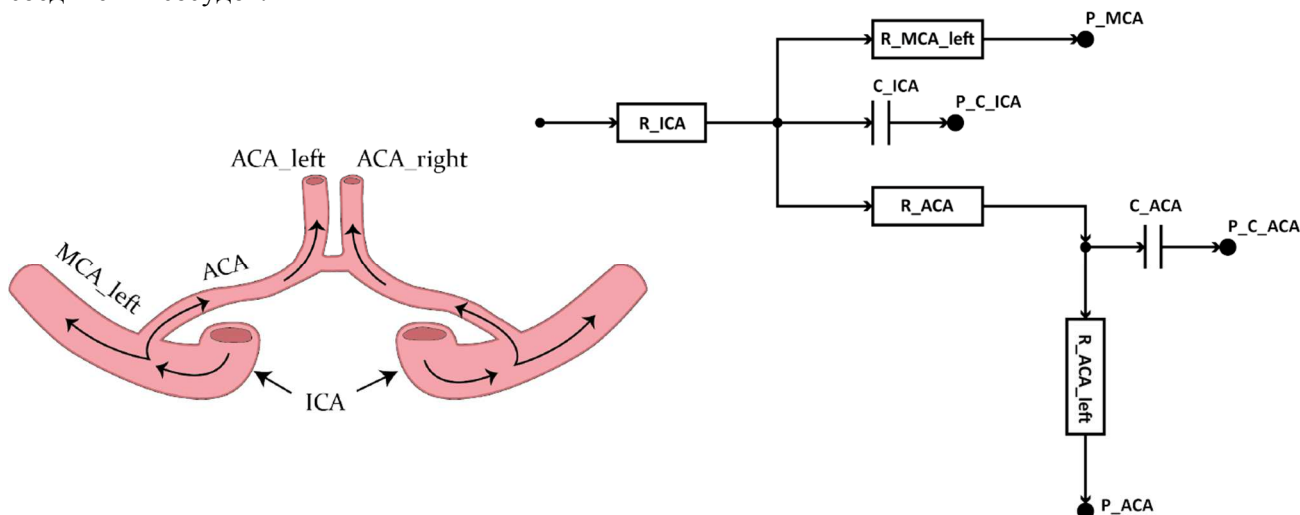
¹ Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

² ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии», Новосибирск

e-mail: july9696@mail.ru

В современной клинической практике одним из широко распространённых методов лечения является формирование обходных сосудистых анастомозов. При лечении церебральных аневризм данная техника применяется в случаях, когда вместе с патологией хирург вынужден перекрыть жизненно важный кровеносный сосуд. Анастомоз в таких случаях устанавливается для компенсации кровотока из перекрытой артерии. Тем не менее, открытым остаётся вопрос о выборе оптимальных параметров соединения сосуда-донора и сосуда-реципиента, таких как угол и место соединения, разрез артериометрического окна и др.

Ранее мы исследовали вопрос о нахождении оптимального угла формирования обходных анастомоз [1], однако параметры подбирались вручную, что существенно сокращало область поиска, а также увеличивало его время. В данном исследовании для оптимизации формирования сосудистых анастомозов, в частности, для поиска оптимального места соединения двух сосудов, используется метод роя частиц [2]. В качестве целевой функции, значение которой должно быть минимизировано, была выбрана разница давлений на выходе из сосуда-донора до и после формирования анастомоза. Давление определяется на основе использования 1D- и 0D-гемодинамики. В результате работы было выполнено сравнение использования двух различных моделей при определении оптимального места соединения сосудов.



Геометрия сосудистой сети до операции (слева), электрическая цепь (0D-модель), описывающая данную конфигурацию (справа).

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

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

2. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimization // Swarm Intelligence. 2007. V. 1, №1, P. 33-57.

РАСЧЕТ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛИ НАСОСА ОТ ДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

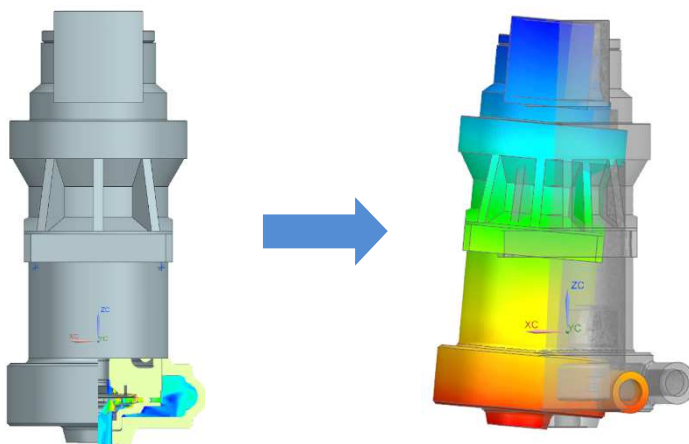
Куликов Д.А., Фомин М.Н., Шмелев Е.И.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: kulikov_da@okbm.nnov.ru

Процессы обтекания поверхностей конструкций насосного оборудования рабочей средой сопровождаются возбуждением гидродинамических сил. Данные силы при определенных условиях являются одной из существенных причин повышенной вибрации, что при определенных условиях неблагоприятно сказывается на характеристиках оборудования.

Оценка влияния геометрических особенностей ПЧ насосного оборудования на АЧХ возбуждающих сил и виброотклика конструкции является актуальной задачей [1]. На сегодняшний день, данные оценки могут быть выполнены путем решения связанной трехмерной задачи гидродинамики и динамики конструкции [2]. В настоящем докладе представлены результаты численных исследований влияния гидродинамики потока на вибрационные характеристики электронасоса. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными, полученными по методике апробированной и описанной в [3].



В качестве исследуемой модели рассматривался прототип герметичного электронасоса разработки АО «ОКБМ Африкантов» на амортизаторах с элементами трубопроводов испытательного стенда. Проточная часть насоса включает в себя рабочее колесо, направляющий аппарат и гидрокамеру.

Расчет гидродинамической силы выполнялся с использованием вихреразрешающей модели турбулентности LES во временной области без учета влияния колебаний поверхности корпуса насоса на поток рабочей среды. Для расчета виброотклика использовалось распределение пульсаций давления. Пульсации давления на поверхность структурной модели интерполировались с поверхности гидродинамической сетки. Расчет виброперемещений осуществлялся в частотной области с использованием прямого подхода.

По результатам численного анализа были получены спектры пульсаций давления непосредственно в гидрокамере насоса, а также спектры виброскорости в точках на корпусе. Из анализа спектров было установлено, что наблюдается хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных по амплитудам пульсаций давления и виброскорости, что позволяет на этапе проектирования выполнять прогнозирование уровней виброскорости для вновь разрабатываемого оборудования и в случае необходимости модернизировать геометрию проточной части.

1. Y.Y.Jiang, S.Yoshimura, R.Imai Quantitative evaluation of flow-induced structural vibration and noise in turbomachinery by full-scale weakly coupled simulation// Journal of Fluids and Structures 23. 2007. 14 p.
2. Lenka Dobšáková, Nadežda Novakova, Vladimir Haban Vibrations of hydraulic pump and their solution// EPJ Web of Conferences 143. 2017. 6 p.
3. M.A.Bolshukin, A.V.Budnikov, D.A.Kulikov Dynamic measurements of the flow and structure oscillations to validate FSI calculations// Nuclear Engineering and Design 381. 2021. 8 p.

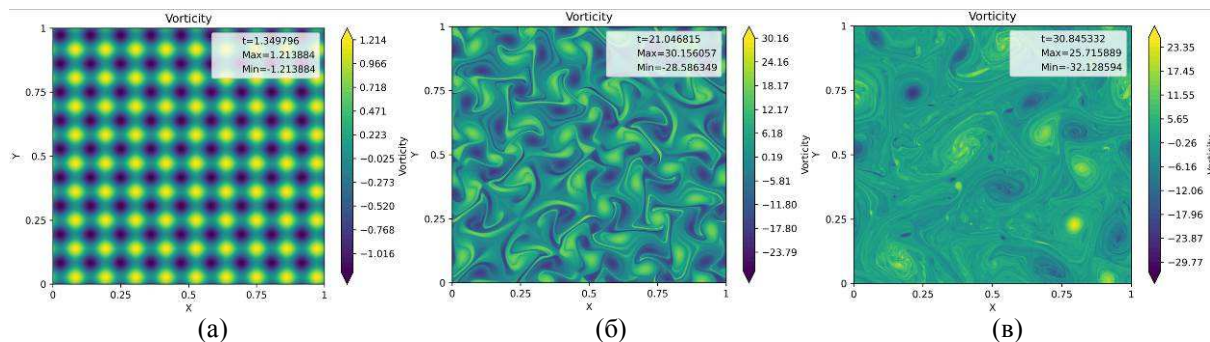
ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ

Куликов Ю.М., Долуденко А.Н.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: kulikov-yurii@yandex.ru

В работе обсуждаются результаты исследования эволюции плоского течения Тейлора–Грина, а также свойства хаотических решений уравнений Навье–Стокса с гармонической вынуждающей силой в двумерной постановке. Моделирование проводилось на основе собственной реализации численного метода КАБАРЕ, использующего приближение слабой сжимаемости [1]. Решение задачи Тейлора–Грина в случае ламинарного распада ($Re=100$) позволяет сравнить скорость численной диссипации для различного количества вихрей с аналитической зависимостью. Такое сравнение позволяет определить количество ячеек расчетной сетки, необходимое для разрешения вихрей определенного масштаба. Моделирование плоского течения вязкой жидкости под действием гармонической возбуждающей силы [2] проводилось при числах Рейнольдса $Re_1=22000$ и $Re_2=440000$ для последовательности вложенных сеток с 64^2 , 128^2 , 256^2 , 512^2 , 1024^2 , 2048^2 ячейками. Свойства получаемых хаотических решений обсуждаются на основе временных зависимостей энергии, энтропии, палинстрофии, а также полей завихренности и спектральных характеристик.



Стадии развития течения на примере поля завихренности: (а) – регулярная система вихрей, (б) – развитие неустойчивости, (в) – формирование многомасштабного поля завихренности.

1. Kulikov Yu.M., Son E.E. Double shear layer evolution on the non-uniform computational mesh // Physica Scripta. 2021. Vol. 96. P. 125262.
2. Doludenko A.N., Fortova S.V., Kolokolov I.V., Lebedev V.V. Coherent vortex in a spatially restricted two-dimensional turbulent flow in absence of bottom friction // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33. №1. P. 011704.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАЛКОВОГО ОТЖИМА

Хуррамов Ш.Р., Курбанова Ф.З., Алибоев К.Ю.

Ташкентский архитектурно строительный институт, Узбекистан, Ташкент
e-mail: shavkat-xurramov59@mail.ru

Одним из наиболее экономичных и универсальных видов машин, используемых во многих отраслях промышленности при выполнении различных технологических процессов, являются валковые машины. Особую группу в технологии механической обработки материалов, осуществляемых в валковых машинах, составляет процесс валкового отжима мокрого материала. В этом процессе наблюдается одновременное происхождение двух явлений – контактное взаимодействие и фильтрация влаги. В соответствии с этих двух явлений, теория валкового отжима мокрых материалов также представляет собой совместного решения два типа задач: первый тип – контактное взаимодействие в двухвалковых модулях (контактные задачи); второй тип – фильтрация влаги в деформируемой неоднородной пористой среде (гидравлические задачи).

В статье приведены результаты совместного решения контактных и гидравлических задач теории валкового отжима мокрых материалов.

Поставленные задачи решены для обобщенного двухвалкового модуля, в котором валки расположены относительно вертикали наклоном справа под углом, имеют неравные диаметры и эластичные покрытия из материалов с различными жесткостями и коэффициентами трения. Слой материала имеет равномерную толщину и подан наклоном вниз относительно линии центров (линия, соединяющая центры вращения валков) под некоторым углом (рис.1).

Решением контактных задач разработаны математические модели углов контакта, формы кривых контакта валков, напряжений трения, а также распределения нормальных и касательных напряжений по кривым контакта валков. Они являются общими в том смысле, что описывают всех моделей частных случаев взаимодействия обрабатываемого материала с парами валков двухвалковых модулей технологических машин.

Решением гидравлических задач получены математические модели распределения гидравлического давления и изменения удаленной влаги в зоне отжима.

Совместное решение задач контактного взаимодействия и гидравлики теории валкового отжима мокрых материалов позволило получить модели распределения контактных напряжений и гидравлического давления, соответствующие теоретическими выводами и экспериментальными эпюрами ранее выполненных исследований.

С применением полученных математических моделей найдены расчетные формулы таких параметров валкового отжима мокрых материалов, как: длины кривых контакта, зон скольжения и прилипания, величины углов, отделяющих зоны прилипания от зон скольжения, величины энергосиловых параметров и остаточной влажности обрабатываемого материала.

1. Хуррамов Ш.Р. Аналитическое описание формы кривых контакта валков в двухвалковом модуле // Известия высших учебных заведений, Технология текстильной промышленности» – Иванова, 2021. – №4 (394). – С. 153-158.

2. Khurramov Sh. R., Abduraimov A., Khalturayev F.S., Kurbanova F.Z. Modeling of friction stress in twin roll modules // Journal of Physics: Conference Series, ICEMP-2021, Stambul, Turkey, 1789(2021)012008 doi:10.1088/1742-6596/1789/1/012008.

3. Khurramov Sh. R., Khalturaev F.S., Buriev E.S. Residual moisture concent in semi-finished leather under roller pressing" AIP Conference Proceedings, MIP Injenering -III, Krosnoyarsk, Russia, 2402(2021)030038 <https://doi.org/10.1063/5.0071265>.

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СПЛАВА ВТ6 В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЦИКЛОВ ДО РАЗРУШЕНИЯ

Ледон Д.Р., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: ledon@icmm.ru

В работе предлагается математическая модель [1], способная описывать и предсказывать усталостное разрушение металлов и сплавов в диапазоне циклов нагружения от 10^4 до 10^9 . Преимуществом предложенной модели является единый набор констант материала для всего диапазона циклов и способность при этом описывать эффект дуальности кривой Вёлера, а также повышение предела выносливости с возрастанием частоты нагружения.

Для снижения временных затрат при проведении численных расчетов при количестве циклов до разрушения $\sim 10^9$, предлагается частный случай построенной модели, допускающий аналитическое решение. Полученное аналитическое решение приводится к формуле, которая отражает зависимость числа циклов до разрушения от параметров нагружения: амплитуда напряжений, частота, скорость деформации, чувствительность к скорости деформации и исходное структурное состояние материала. Формула хорошо предсказывает усталостную диаграмму в диапазоне циклов 10^8 – 10^9 , что обусловлено гипотезами, допущенными при ее получении: малые амплитуды приложенных напряжений, линейная связь напряжений и деформаций. За пределами указанного интервала формула начинает резко расходиться с экспериментом, однако ее можно успешно использовать в наиболее затратном для численных расчетов диапазоне циклов нагружения 10^8 – 10^9 .

Результаты численных и аналитических расчетов, а также экспериментальные данные изображены на рисунке. Синие и оранжевые точки – это экспериментальные данные из работы [2]. Зелёные – экспериментальные данные авторов настоящей работы, полученные на ультразвуковой испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при симметричном цикле и частоте нагружения 20 кГц. Красная и фиолетовая линии – численные расчеты при частоте 100 Гц и 20 кГц. Оранжевой линией показан расчет по аналитической формуле при частоте 20 кГц.

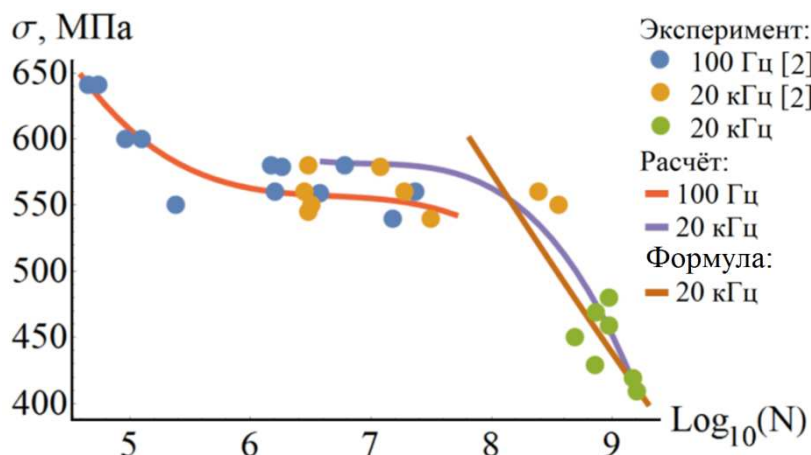


Рис. Расчётная и экспериментальная S-N-диаграммы для сплава ВТ6.

Для демонстрации возможности использования предложенной модели для оценки надежности конструкций решена краевая задача усталостного нагружения лабораторного образца в двумерной (осесимметричной) постановке. Смоделирован процесс выхода усталостной трещины на поверхность образца после ее зарождения в объеме материала. Получен ряд качественных соответствий с экспериментальными данными. Таким образом, рассмотренную модель можно применять для оценки долговечности материалов и конструкций.

1. Ledon D.R., Bannikov M.V., Oborin V.A., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. Prediction of the fatigue life of VT1-0 titanium in various structural states under very high cycle fatigue // Letters on Materials. 2021. V. 11, No. 4. P. 422-426.

2. Takeuchi E., Furuya Y., Nagashima N., Matsuoka S. The effect of frequency on the gigacycle fatigue properties of a Ti-6Al-4V alloy // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 2008. V. 31. P. 599-605.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ЦЕПОЧКЕ ГУКА СО СВОБОДНЫМ КОНЦОМ

Ляжков С.Д.^{1,2}, Кузькин В.А.^{2,1}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

e-mail: sergeiliazhkov@gmail.com

Рассматривается перенос тепловой энергии в полубесконечной цепочке Гука, как при мгновенном тепловом возмущении, так и при внешнем подводе энергии. Предложено аналитическое описание нестационарных тепловых процессов в континуальной и дискретной постановках. Дискретное решение для кинетической температуры находится через точное выражение для скоростей частиц, но вместо подходов, используемых в работах [1,2], используется метод разложения по собственным формам. Континуальное решение для кинетической температуры получено с использованием метода, предложенного в [3]. Показано, что вблизи границы континуальное и дискретное описания температурных полей существенно различаются. Однако, дальние поля можно описывать как дискретной, так и континуальной теориями (см. Рис.1). На примере точечного мгновенного возмущения, продемонстрировано свойство отражения тепловых волн от границы.

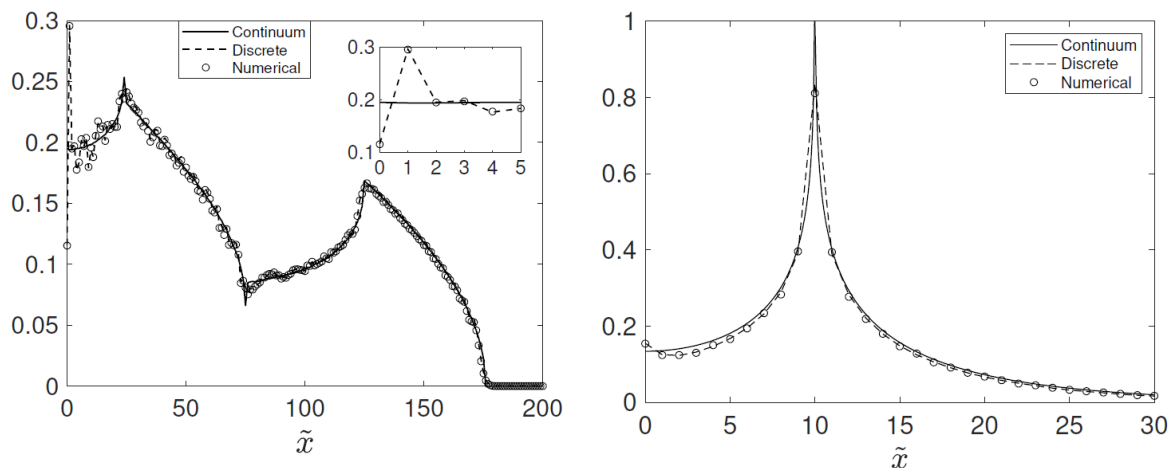


Рис. 1. Скачок кинетической температуры на свободной границе полубесконечной цепочки при мгновенном возмущении (слева) и стационарное поле кинетической температуры (справа).

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ № 21-71-10129.

1. E. Schrödinger, Zur Dynamik elastisch gekoppelter Punktsysteme, Annalen der Physik 44 (1914) 916-934.
2. G. Klein, I. Prigogine, Sur la mécanique statistique des phénomènes irréversibles I, Physica 19 (1) (1953) 74-88.
3. Kuzkin, V.A., Krivtsov, A.M. Unsteady ballistic heat transport: linking lattice dynamics and kinetic theory. ActaMechanica, Issue 5 (2021).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ГРАНУЛИРОВАННЫМИ ПРЕГРАДАМИ В УДАРНЫХ ТРУБАХ

Лисицын А.А.

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

В работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия ударной волны, подобной взрывной, с деформируемой преградой в виде насыпного гранулированного слоя - песка, который находится на торце удлинённой ударной трубы [1,2]. Численные результаты получены с помощью пакета программ «Динамика-1». Для описания поведения грунта и газа используется схема Годунова, модифицированная в [3]. Грунт предполагается необратимо-деформируемой средой. Одномерная расчётная область состоит из двух подобластей: воздуха и песка. Область воздуха также разделена на две области: справа - области низкого давления (LPC), длиной 6 метров и слева - высокого давления, длиной 0.25 м (НРС). В начальный момент времени давление в НРС равно 15 атм., в LPC - 1 атм. Гранулированный слой толщиной 10 мм находится на правом торце LPC. НРС и LPC разделены диафрагмой, которая разрушается в начальный момент времени. В результате распада разрыва, образованная результирующая волна взаимодействует с грунтом, сжимает его, в песке начинают происходить волновые процессы из-за чего между жёсткой стенкой и нагруженной поверхностью песка происходят множественные отражения, показанные на рисунке. Происходит падение амплитуд волн с течением времени.

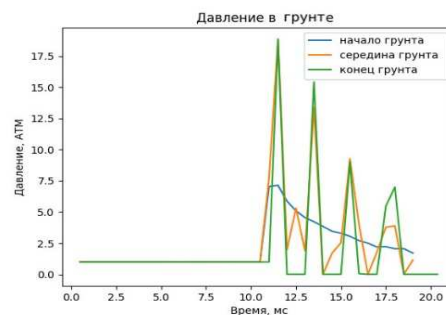


Рис. Осциллограммы давления в грунте.

Сравнение численных и экспериментальных результатов показало, что амплитуда давления численных результатов в начальной фазе взаимодействия сильно завышена в сравнение с экспериментом: 18 атм. и 3 атм. соответственно. Связано это с тем, что численная модель не учитывает вязкостные процессы. В дальнейших исследованиях необходима доработка численной модели и учёт коэффициента вязкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-29-00672).

1. Мiroва О. А., Котельников А. Л., Голуб В. В., Баженова Т. В., Паршиков А. Н., Влияние скорости разлета материала защитного песчаного экрана на ослабление импульса отраженной от него взрывной волны, ТВТ, 2016, том 54, выпуск 5, 761-766.

2. Котельников А. Л., Мiroва О. А., Голуб В. В., Баженова Т. В., Ленкевич Д. А., Исследование взаимодействия взрывной волны с разрушаемым экраном из гранулированного материала, ТВТ, 2014, том 52, выпуск 5, 739-745.

3. 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.

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В АККРЕЦИОННЫХ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКАХ

Ливенец З.Д.¹, Луговский А.Ю.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

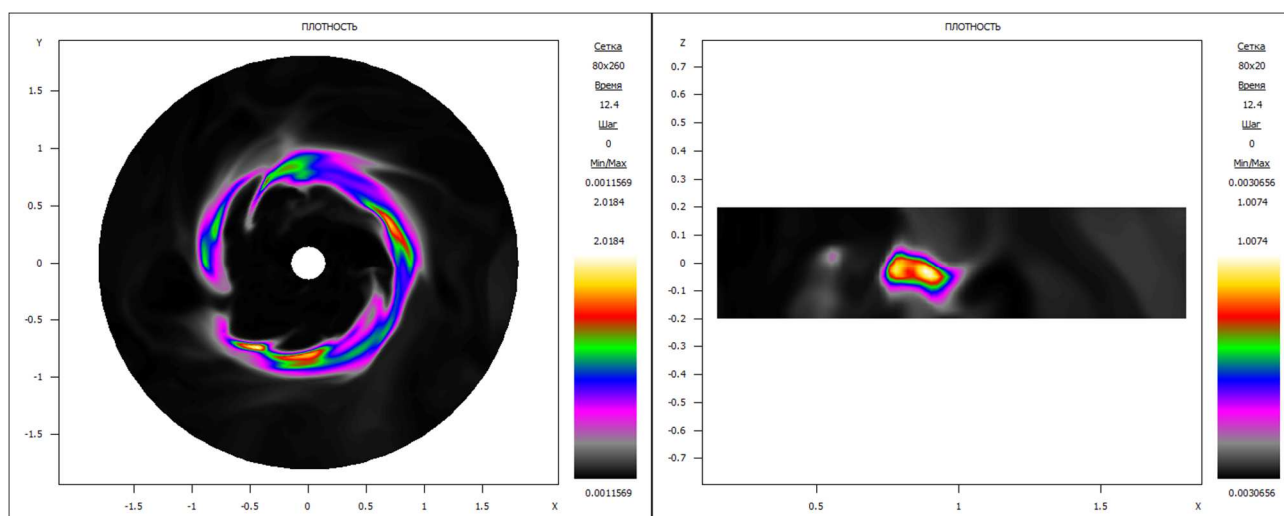
² Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

e-mail: zaxarus@inbox.ru

Целью работы является исследование свойств аккреционных звездных дисков при моделировании нестационарных процессов в них. Подобные газовые диски формируются вокруг компактных небесных тел большой массы. Таким объектом может быть нейтронная звезда или черная дыра. В результате захвата гравитационным полем звезды межзвездного газа с большим угловым моментом возникает аккреционный диск. Для того, чтобы вещество аккрецировало (падало) на звезду, необходим отвод углового момента от вещества диска. Известно много механизмов отвода углового момента от вещества аккреционного диска, но все они имеют те или иные недостатки.

Особый интерес представляет развитие крупномасштабной турбулентности в сдвиговом течении аккреционного диска, для изучения которого используется компьютерное моделирование данного процесса. Интересно проверить некоторые гипотезы. Возможно ли появление крупномасштабных вихрей в сдвиговом течении аккреционного диска? Способны ли подобные структуры привести к перераспределению углового момента и обеспечить необходимый темп аккреции (массовая скорость падения вещества на центральное тело)? Правомерен ли двумерный подход для изучения аккреционных дисков?

В работе исследуется новый механизм переноса углового момента крупными вихревыми структурами, возникающими в сдвиговом течении вещества аккреционного диска.



Распределение плотности в аккреционном диске.
Слева - сечение $z=0$, справа – сечение $\phi=0$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-11-20165).

1. Ливенец З.Д., Луговский А.Ю. Формирование и эволюция крупномасштабных вихревых структур в аккреционных звездных дисках // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2022. № 5. С. 1-19.

2. Велихов Е.П., Луговский А.Ю., Мухин С.И., Попов Ю.П., Чечеткин В.М. Роль крупномасштабной турбулентности в перераспределении углового момента в аккреционных звездных дисках // Астрономический журнал. 2007. Т. 84. №2. С. 177-184.

3. Луговский А. Ю., Мухин С.И., Попов Ю.П., Чечеткин В.М. Развитие крупномасштабной неустойчивости в аккреционных звездных дисках и ее влияние на перераспределение углового момента // Астрономический журнал. 2008. Т. 85. №10. С. 901-905.

4. Луговский А.Ю., Чечеткин В.М. Развитие крупномасштабной неустойчивости в Кеплеровских аккреционных звездных дисках // Астрономический журнал. 2012. Т. 89. №2. С. 120-127.

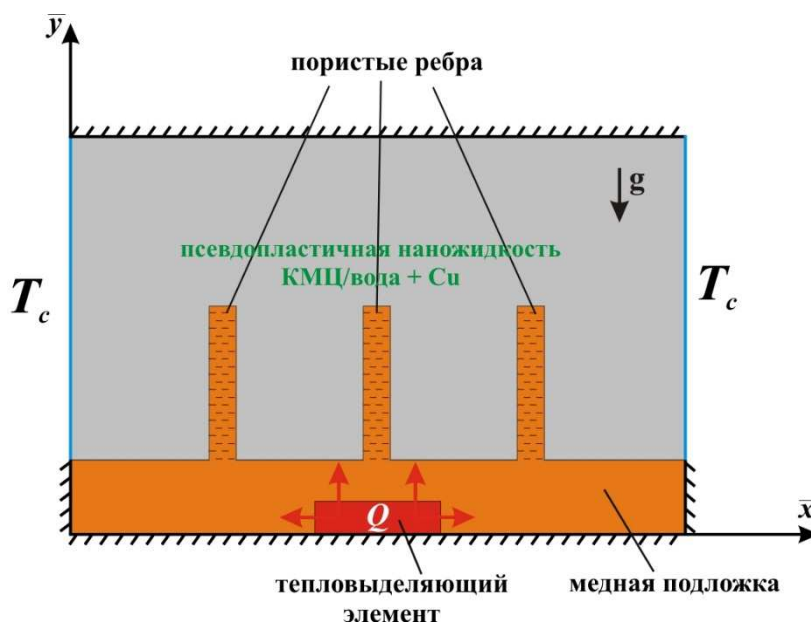
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ПСЕВДОПЛАСТИЧНОЙ НАНОЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ И ПОРИСТЫМИ РЕБРАМИ

Лоечко Д.С., Шеремет М.А.

Томский государственный университет, научно-исследовательская лаборатория моделирования процессов конвективного теплопереноса, Томск

e-mail: whiteink@bk.ru

Работа посвящена численному исследованию естественной конвекции псевдопластичной наножидкости, состоящей из смеси карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) с водой и наночастицами меди. Хладагент заполняет квадратную замкнутую полость, горизонтальные и часть вертикальных стенок – адиабатические, оставшаяся часть вертикальных стенок поддерживается при постоянной низкой температуре T_c . На нижней стенке полости расположен локальный источник постоянного объемного тепловыделения Q внутри твердой подложки. С целью интенсификации теплоотвода используются пористые ребра, материалом которых является металлическая пена.



Псевдопластичное поведение используемой жидкости описывается степенным законом Оствальда-де-Вилля. Эффективные параметры наножидкости вычисляются на основе экспериментальных корреляций, отражающих влияние температуры. Математическая модель построена с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии в преобразованных безразмерных переменных «функция тока – завихренность» на основе приближения Буссинеска для описания влияния выталкивающей силы и модели Дарси–Бринкмана для описания транспортных процессов внутри пористых ребер. Разработанный вычислительный код был протестирован на множестве сеток, а также на основе решения модельных задач. Полученное хорошее согласование с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов позволило использовать разработанный алгоритм для решения рассматриваемой задачи.

В ходе численных исследований был проведен анализ влияния определяющих параметров (количество пористых ребер, пористость и проницаемость металлической пены) на гидродинамику и теплоперенос с использованием изолиний функции тока и температуры, а также значений средней температуры внутри источника. Показана возможность интенсификации теплоотвода от источника энергии при использовании пористых ребер.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА МЕХАНИЧЕСКОГО И ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА УЗЛОВ ГЕРМЕТИЗАЦИИ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Ереев М.Н., Лонин К.А., Панов В.А., Патрушев В.Л., Соловьев С.А.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: lonin_ka@okbm.nnov.ru

В современных реакторных установках (РУ) широко применяются узлы герметизации различного конструктивного исполнения, в том числе и для оборудования и систем первого контура, что предъявляет к ним высокие требования по надежности и обеспечению безопасности.

В АО «ОКБМ Африкантов» для механического и прочностного анализа узлов герметизации разработана программа «FLANARM 1.0» предназначенная для расчета на статическую и циклическую прочность корпусных элементов и шпилек фланцевых соединений. Методики, заложенные в программе, основаны на [1-3] с учетом многолетнего опыта проектирования и эксплуатации данного типа конструкций. Программа «FLANARM 1.0» автоматически проводит расчет и анализ НДС в соответствии с требованиями [1] по всем категориям действующих приведенных напряжений с соответствующими им допускаемыми и оформляет полученные результаты в виде текстовых файлов.

Для верификации программы «FLANARM 1.0» была создана экспериментально-техническая база, которая позволила провести её валидацию путем решения широкого класса механических и прочностных задач для узлов герметизации РУ и обеспечить современные требования к проведению расчетов.

К настоящему времени разработан тематический отчет, верификационный отчет и инструкция пользователя, в соответствии с которым программа «FLANARM 1.0» аттестована и используется при проектировании РУ различных типов и назначений.

Статическая прочность шпилек фланцевых соединений

Фланцевое соединение № 1

Данные одного фланцевого соединения

Количество шпилек, z	6	Высота рабочей части резьбы гайки, h _г	20	Наружный диаметр втулки, D _н	31	☒ Температура T > 50 °C
Свободная длина шпильки, l _ш	120	Высота рабочей части резьбы корпуса, h _к	40	Внутренний диаметр втулки, D _в	25	
Податливость фланца 1, W ₁	3.83E-09	Шаг резьбы гайки, S _г	2.5	Материал прокладки	1 МЕДЬ М1,М2,М3	
Податливость фланца 2, W ₂	3.73E-09	Шаг резьбы корпуса, S _к	2.5	Материал шпильки	12 СТАЛЬ 25X11МФ КТ6	
Принятый момент на ключе при начальной затяжке, М	260000	Диаметр герметизации, D _г	142	Материал гайки	12 СТАЛЬ 25X11МФ КТ6	
Наружный диаметр резьбы, D ₀	20	Наружный диаметр опорной поверхности, D _{оп}	142	Материал корпуса	2 СТАЛЬ 08X18Н10Т РД 1	
Диаметр стержня шпильки, D _с	19.48	Внутренний диаметр опорной поверхности, D _{вн}	135	Материал втулки	12 СТАЛЬ 25X11МФ КТ6	
Минимальный диаметр стержня шпильки, d _с	19.48	Высота прокладки, h _р	3			
Диаметр осевого отверстия в шпильке, d _т	0	Длина втулки, l _в	15			

Данные по углам поворота фланцев

№ режима	Угол поворота фланца 1	Угол поворота фланца 2	Радиальное перемещение фланца 1	Радиальное перемещение фланца 2	Расчетная температура шпильки	Расчетная температура гайки	Расчетная температура корпуса
1	0.000133	-0.000129	0.00507	0.00303	20	20	20
2	-9.33E-05	-9.38E-05	0.00901	0.00755	20	20	20
3	-0.00012	-0.000119	0.115	0.113	90	90	100

Данные по участкам фланцев

№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина участка	15	95	3	7	0	0	0	0
Материал	8	6	1	6	0	0	0	0
Температура в режиме 1	20	20	20	20	0	0	0	0
Температура в режиме 2	20	20	20	20	0	0	0	0
Температура в режиме 3	100	100	100	100	0	0	0	0

Данные по участкам шпилек

№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина участка	120	0	0	0	0	0	0	0
Материал	8	0	0	0	0	0	0	0
Температура в режиме 1	20	0	0	0	0	0	0	0
Температура в режиме 2	20	0	0	0	0	0	0	0
Температура в режиме 3	90	0	0	0	0	0	0	0

Расчетная схема

Сохранить

Закрыть окно

Интерфейс ввода исходных данных программы «FLANARM 1.0».

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ // М., «Энергоатомиздат». 1989 г.
2. Волошин, А.А. Расчет фланцевых соединений трубопроводов и сосудов // Л., Судпромгиз. 1959 г.
3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф. Расчет на прочность деталей машин // М., «Машиностроение». 1979 г.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ С ДИФFUЗОРНЫМИ КАНАЛАМИ

Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И., Трифонов В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: mariia.makarova@gmail.com

С использованием трехпараметрической RANS-модели турбулентности [1] проведено численное моделирование течения и теплообмена в противоточном пластинчатом теплообменнике с двумя смежными диффузорными каналами с малыми (1 градус) углами расширения. В качестве жидкостных теплоносителей в широком диапазоне молекулярных чисел Прандтля рассмотрены: ртуть ($Pr=0.026-0.029$), вода ($Pr=4.3-5.4$) и трансформаторное масло ($Pr=30-112$). Для всех теплоносителей были приняты одинаковые исходные данные: длина теплообменника 0.5 м; входные числа Рейнольдса для «холодного» теплоносителя $Re=10000$, для «горячего» - $Re=3000$; входная разность температур «горячего» и «холодного» теплоносителей составляла 100 К. Для сравнения рассмотрен теплообменник с каналами постоянного сечения с теми же исходными данными (рис. 1).

Показано, как и в [2] для воды, что коэффициент теплоотдачи практически на всей длине в теплообменнике с диффузорными каналами превосходит соответствующие величины для теплообменника с каналами постоянного сечения. Полученные в расчетах величины интенсивности турбулентности и напряжения сдвига существенно возрастают в диффузоре, что приводит к интенсификации теплообмена в теплообменнике с диффузорными каналами. За счет этого в теплообменниках с диффузорными каналами количества переданного тепла от «горячего» теплоносителя к «холодному» существенно возрастает по сравнению с теплообменниками с каналами постоянного сечения. Следствием этого является увеличение разности температур в «горячем» потоке на входе и выходе из теплообменника с диффузорными каналами по сравнению с теплообменником с каналами постоянного сечения.

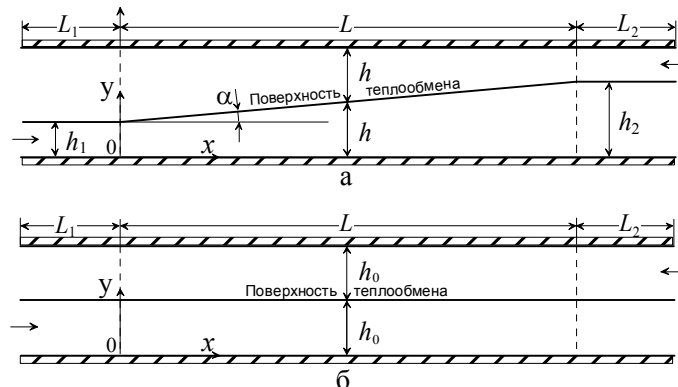


Рис. 1. Расчетная схема элемента пластинчатого противоточного теплообменника с двумя плоскими диффузорами (а) и с двумя каналами постоянного сечения (б).

Для оценки влияния числа Прандтля теплоносителя на теплоотдачу от «горячего» теплоносителя к «холодному» введена величина отношения количества переданного тепла Q к расходу «горячего» теплоносителя G_h . Показано, что эта величина максимальна для воды ($Q/G_h \sim 49$ кВт/(кг/с)), промежуточна для ртути ($Q/G_h \sim 13$ кВт/(кг/с)) и минимальна для трансформаторного масла ($Q/G_h \sim 9$ кВт/(кг/с)).

Работа выполнена в рамках исследований, финансируемых госбюджетом (№AAAA-A19-119012990110-0, AAAA-A19-119012990115-5).

1. Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 3. С. 13-25.

2. Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Пластинчатый теплообменник с диффузорными каналами // ТВТ. 2020. Т.58. № 3. С. 376–383.

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ПО ДЛИНЕ ЧИСЛОМ МАХА

Лущик В.Г., Макарова М.С.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: mariia.makarova@gmail.com

С использованием трехпараметрической дифференциальной RANS-модели турбулентности [1] проведено численное исследование турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления в сверхзвуковом потоке. Положительный градиент давления был реализован за счет уменьшения числа Маха по длине пластины. Исследование проведено для ряда значений входного числа Маха M и температурного фактора θ .

Для случаев теплоизолированной и теплопроводной стенки проведено обобщение относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} по параметру градиента давления β , которое можно считать успешным в отличие от обобщения по параметру торможения потока K , где расслоение расчетных зависимостей для разных законов изменения числа Маха значительное. Показано, что изменение коэффициента восстановления r от параметра градиента давления в диапазоне $\beta=0\div20$ очень слабое и не выходит за пределы точности измерений $r=0.88\pm0.02$, как и в случае безградиентного потока [2].

В случае теплопроводной стенки обобщение относительной величины коэффициента трения C_f/C_{f0} по параметру β для охлаждаемой стенки ($\theta=0.5$) более успешно, чем для нагреваемой ($\theta=1.5$). Влияние положительного градиента давления в сверхзвуковом потоке на профили скорости существенно в основной части пограничного слоя и слабое в пристеночной области, и для нагреваемой стенки ($\theta>1$) проявляется сильнее, чем для охлаждаемой ($\theta<1$) и теплоизолированной. Профили интенсивности турбулентности как для теплоизолированной, так и теплопроводной стенки свидетельствуют о существенной турбулизации пограничного слоя с ростом положительного градиента давления по сравнению с дозвуковым безградиентным пограничным слоем [3].

Зависимость коэффициента аналогии Рейнольдса K_{Re} от числа Маха M и температурного фактора θ в диапазоне $M=1\div3$ и $\theta=0.5\div1.5$ в безградиентном потоке слабая. В потоке с положительным градиентом давления величина K_{Re} существенно зависит от параметра β и результаты расчетов для четырех законов изменения числа Маха для $\theta=0.5-1.5$ достаточно хорошо обобщаются.

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

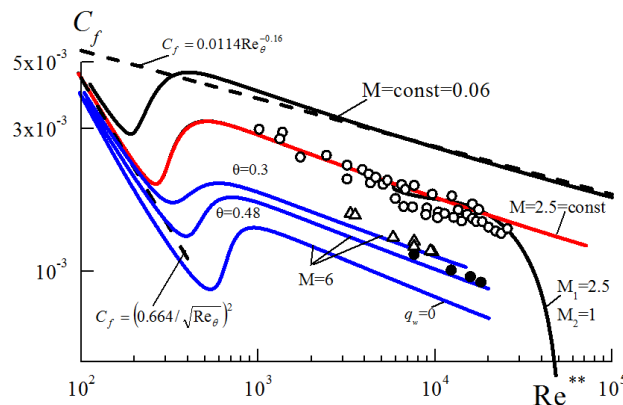


Рис. Зависимость величины коэффициента трения C_f от числа Рейнольдса по толщине потери импульса Re^{**} : влияние продольного градиента давления и температурного фактора.

1. Лущик В. Г., Макарова М. С., Якубенко А. Е. Применение трехпараметрической модели сдвиговой турбулентности для решения задач внешнего обтекания поверхностей потоком сжимаемого газа // Программная инженерия. 2017. Т. 8, № 12. С. 562-574.

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

3. Лущик В. Г., Макарова М. С. Численное моделирование турбулентного пограничного слоя с положительным градиентом давления // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2022. № 3. С. 102-114.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТОРНАДО-ЦИКЛОНА

Маслов С.А.^{1,2}, Натяганов В.Л.¹

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

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: sergm90@mail.ru

Торнадо-циклоном (ТЦ) называется вращающееся грозовое облако, из которого обычно формируются воронки торнадо, некоторые механизмы генерации которых рассмотрены в [1]. В ряде работ для исследования торнадо-циклона применяется чисто гидродинамическая модель, согласно которой основную роль в поддержании вращения ТЦ играют силы Кориолиса в Архимеда в устойчиво стратифицированной атмосфере.

Однако важно отметить, что известны случаи сверхбыстрого (в течении десятка минут) формирования торнадо-циклона и его дальнейшей подпитки восходящими вихрями дегазационной природы, которые описаны в монографии Д.В. Наливкина и были зафиксированы в Амурском заливе 20.09.1997 г. вблизи Владивостока. Для такой быстрой генерации завихренности в ТЦ одной силы Кориолиса недостаточно. Поэтому в докладе рассматриваются две модели ТЦ, в которых используется магнитогидродинамическая аналогия (МАГДА) между системами уравнений равновесных магнитногидродинамических конфигураций и стационарного течения идеальной несжимаемой жидкости соответственно для пар «магнитное поле-электрический ток» и «скорость-завихренность». Первая модель основана на прямом решении уравнения Грэда-Шафранова для токамака с D-образным сечением, а вторая модель связана с решением обратной задачи, когда задаются уравнения магнитных поверхностей тороидальной формы с учетом их слабого гофрирования, моделирующего турбулентные пульсации в торнадо-циклоне. По этим уравнениям магнитных поверхностей можно рассчитать распределения магнитного поля и плотность электротока, а затем по МАГДА получить аналогичные формулы для полей скорости и завихренности в торнадо-циклоне. В центральной зоне («дырке» тора) эти модели ТЦ необходимо дополнить восходящим вихрем колоннообразной формы (восходящий поток обозначен на рис. красной стрелкой) с соблюдением равенства давлений на внешней границе этого вихря и внутренней границе тора.

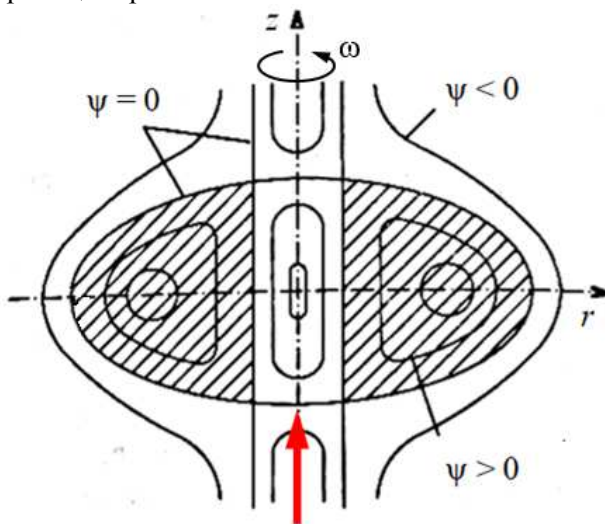


Рис. Сечения магнитных поверхностей (на которых функция магнитного потока $\psi(r,z)=\text{const}$) в токамаке с D-образным сечением шнура. Штриховкой показана внутренность сепаратрисы, буквой ω обозначена завихренность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 22-29-00348).

1. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Влияние зарядовой структуры грозовых облаков на формирование торнадоподобных вихрей // Прикладная физика. 2015. №6. С. 16-20.

ЭЛЕКТРОКАПИЛЛЯРНАЯ ЛЕВИТАЦИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В КАСКАДЕ ПОД ВОРОНКОЙ СМЕРЧА

Маслов С.А.^{1,2}, Натяганов В.Л.¹

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

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: sergm90@mail.ru

Рассматривается влияние атмосферного электрического поля (АЭП) под грозовым облаком на подъем каскада (струи брызг или пыли) с подстилающей поверхности воды или суши вблизи воронки смерча. Каскад часто формируется задолго до касания воронки с подстилающей поверхностью – этот факт не удавалось теоретически обосновать без учета электрических явлений. В статье [1] отмечается, что большие градиенты квадрата напряженности АЭП под грозовым облаком способствуют появлению радиальной электрической силы, которая обеспечивает сбор микрокапель с подстилающей поверхности под центр облака. Кроме того, достаточно высокая концентрация микрокапель воды с тонким поверхностным двойным электрическим слоем (ДЭС) вблизи водной поверхности может приводить к эффекту гигантской диэлектрической проницаемости [2], что, в свою очередь, способствует падению электрогидродинамического давления и подъему капель.

В данном докладе исследуется возможность электрокапиллярного дрейфа водяных капель с ДЭС в сильных электрических полях под торцом воронки. Путем решения модифицированной задачи В.Г. Левича о дрейфе проводящих капель с учетом силы тяжести получено, что в зависимости от размера капли и напряженности АЭП капля поднимается вверх, падает на подстилающую поверхность или левитирует (зависает) на фиксированной высоте. При этом высота каскада, по оценкам очевидцев, может достигать 25 – 30 м и более, в то время как без участия электрических сил столб воды может подняться на высоту не более 10 м. Поэтому в ходе исследования процесса формирования каскада важно учитывать электрические факторы, в том числе электрокапиллярный дрейф микрокапель с подстилающей водной поверхности.

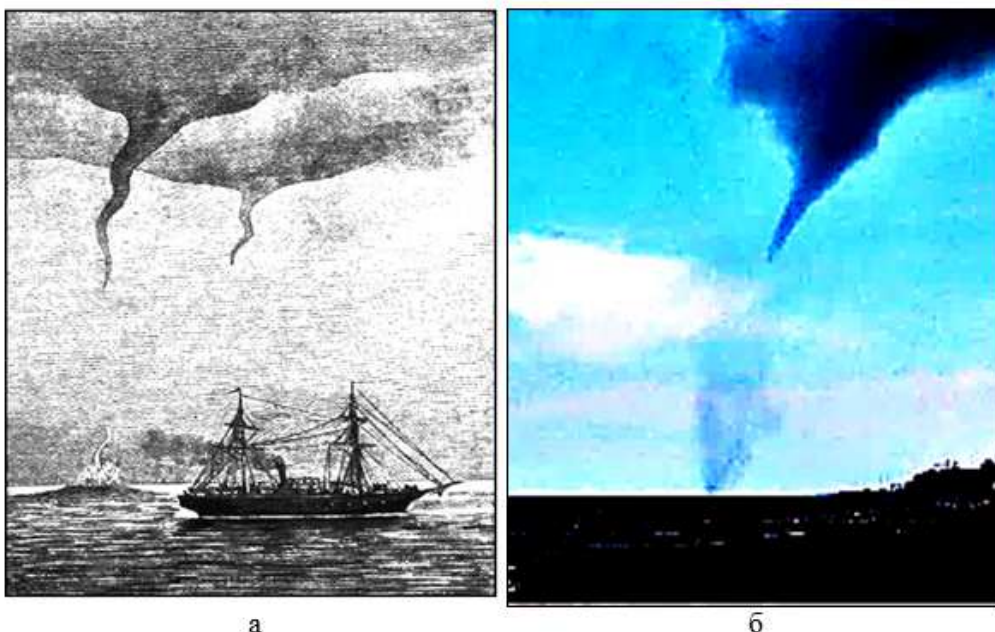


Рис. Начало образования каскада под опускающейся воронкой смерча (а) и высокая струя брызг под торцом воронки, не достигшей водной поверхности (б).

1. Натяганов В.Л., Маслов С.А. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 4. Электромагнитные механизмы формирования торнадоподобного смерча // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2014. №2. С. 32-38.

2. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Роль эффекта гигантской диэлектрической проницаемости в процессе формирования торнадо // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20. №2. doi 10.33257/PhChGD.20.2.828.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Мельников Р.М.¹, Сафарян К.А.¹, Оглезнев А.А.², Кондрашов А.Н.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²ООО «Инверсия Сенсор», Пермь

e-mail: roman2000177@mail.ru

В работе проводится сравнение волнового и лучевого подходов к моделированию многокомпонентных оптоволоконных измерительных систем. Сравнение проводилось по критериям скорости вычислений и точности результатов расчета, которые верифицировались данными натурных испытаний. На основании проведенных тестов показана эффективность совместного использования Гамильтонова формализма для трассировки луча [1-2], движущегося в неоднородной оптической среде (Рис. 1а), и соотношений Френеля для моделирования его поведения на границах раздела [3]. Продемонстрированы возможности разработанного подхода для высокоточного предсказания отклика датчиков перемещения и температуры на волоконных Брэгговских решётках (Рис. 1б), а также соединительных и терминальных компонентах оптоволоконных линий связи.

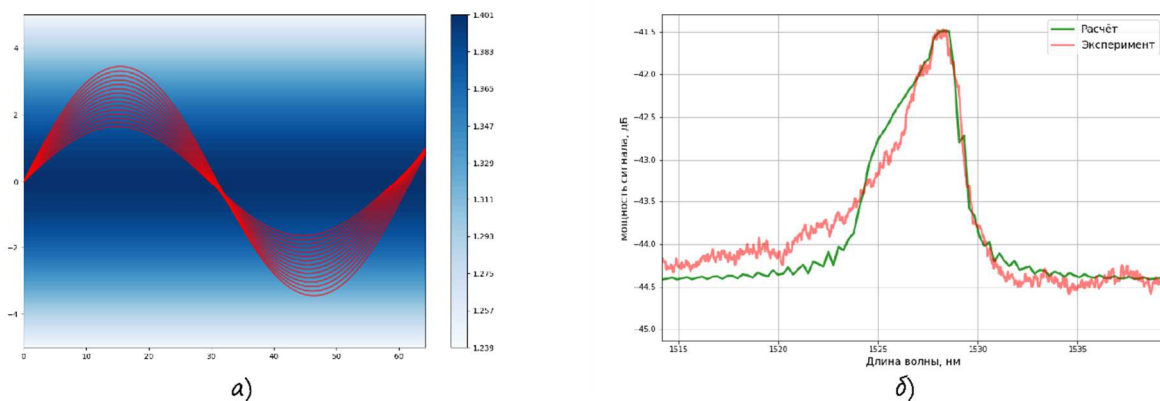


Рис. 1. а) Распространение луча в среде с градиентным показателем преломления; б) сравнение реального и смоделированного спектров сигнала, отражённого от волоконной Брэгговской решётки.

Результаты работы ложатся в основу вычислительного модуля инженерного пакета прикладного программного обеспечения для проектирования комплексных оптических систем. Разрабатываемый программный продукт позволит сократить временные и финансовые затраты на начальных этапах жизненного цикла оптоволоконных компонентов.

1. Chaves J. Introduction to nonimaging optics. – CRC press, 2008.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. – Москва; Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1941.
3. Born M., Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. – Elsevier, 2013.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ В КОНТАКТЕ НЕИДЕАЛЬНО ГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Мещерякова А.Р.^{1*}, Горячева И.Г.¹

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

*e-mail: mif-almira@yandex.ru

Наличие неровностей на поверхности неидеально гладких тел приводит к дискретному характеру взаимодействия, который влияет на распределение контактного давления и изнашивание взаимодействующих тел. Обзор работ, в которых изучалось влияние дискретного характера контактирования упругих тел на контактные характеристики, приведен в [1].

В данном исследовании предложена модель контактно-усталостного разрушения поверхностных слоев неограниченного упругого тела при его взаимодействии со скользящим по его поверхности жестким штампом, обладающим регулярным поверхностным микрорельефом. Моделирование усталостного изнашивания проводится с помощью макроскопического подхода и состоит из следующих этапов: расчет контактных и внутренних напряжений, определение накопленной поврежденности в поверхностном слое материала, расчет толщины отделившегося фрагмента с учётом выбранного критерия разрушения материала, расчёт накопленной поврежденности на следующем шаге и т.д. [2]. В данной работе предполагается, что скорость накопления усталостных повреждений связана с амплитудой изменения максимальных касательных напряжений внутри упругого полупространства. Для расчёта контактного давления применяется метод локализации [3], который основан на аналитическом подходе и позволяет учесть взаимное влияние пятен контакта.

Для жесткого штампа, система выступов которого расположена в узлах гексагональной решетки, проведен анализ влияния плотности расположения выступов и величины номинального давления на распределение максимальных касательных напряжений внутри упругого полупространства и на распределение поврежденности по глубине упругого тела. Результаты сравниваются с расчётами по упрощённой модели, в которой для нахождения распределения контактного давления используется теория Герца. Построенная модель применяется для расчёта кинетики изнашивания типа отслаивания упругого полупространства при скольжении по нему жесткого контртела.

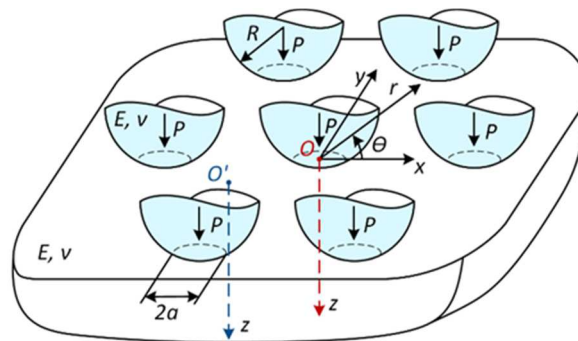


Схема контакта системы выступов жесткого штампа и упругого полупространства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 19-19-00548.

1. Горячева И.Г., Цуканов И.Ю. Развитие механики дискретного контакта с приложениями к исследованию фрикционного взаимодействия деформируемых тел // Прикладная математика и механика. 2020. Т. 84, № 6. С. 757–789.

2. Горячева И.Г., Чекина О.Г. Изнашивание поверхностей: от моделирования микроразрушения к анализу формоизменения // Механика твердого тела, Т. 5. 1999.

3. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. Москва: Наука, 2001. 478 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ

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

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

²Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

e-mail: MikhalchenkoLena@yandex.ru

Структура фронта газовой детонации является сложной, многомерной и существенно зависит от характерного времени взаимодействия гидродинамических процессов и химических реакций. Это является предметом многочисленных исследований, т.к. устойчивость структуры определяет стабильность распространения детонации в самоподдерживающемся режиме. Комбинированное поведение головной и поперечных волн образует конфигурации тройных точек и создает ромбовидные узоры, известные как ячейки детонации. Изучение самоподдерживающейся детонационной структуры и факторов, влияющих на ее быстрое разрушение важно для определения условий разрушения детонационной волны. В данной работе проведено численное исследование формирования ячеистой структуры в водородных и углеводородных смесях с воздухом. Также изучалась возможность подавления ранее возникшей детонации при добавлении ингибитора – пропилена. Исследовалось влияние концентрации пропилена на развитие детонации, вызванной прямым инициированием с помощью притока энергии извне в малом объеме за короткое время, при различной начальной температуре смеси. Рассмотрена возможность решения задачи химической кинетики с помощью искусственных нейронных сетей. Была произведена замена численного дифференцирования жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений нейросетевым решением. Полученная нейронная сеть может, работая в рекурсивном режиме, прогнозировать на много шагов вперед развитие химической системы, состоящей из множества веществ. Рассматривались также сети архитектуры UNET.

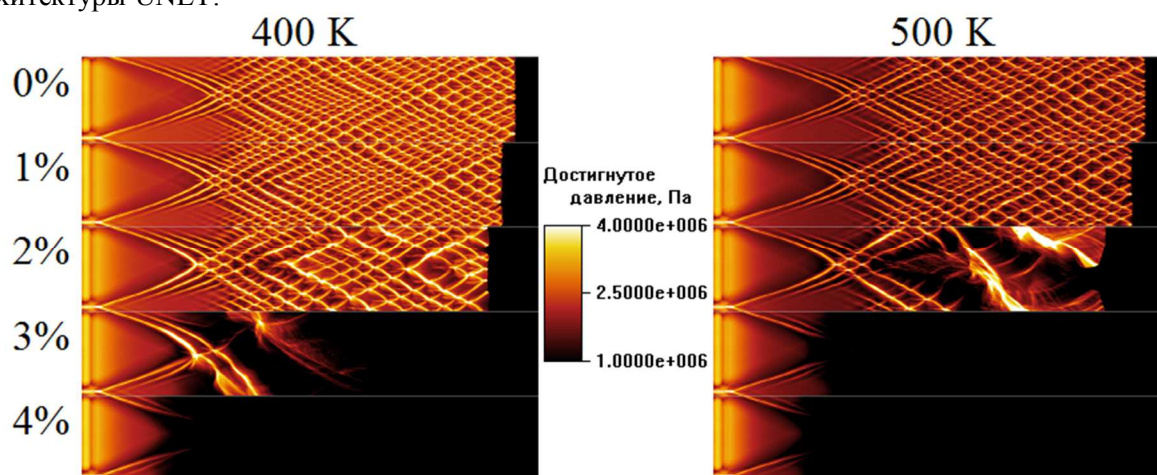


Рисунок 1. Максимально достигнутое давление к моменту времени 50 мкс для различной концентрации пропилена и для начальной температуры 400 и 500 К.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФГУ ФНИЦ ННЦИ 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. Betelin V.B, Kryzhanovsky B.V., Smirnov N.N., Nikitin V.F., Karandashev I.M., Malsagov M.Yu, Mikhalchenko E.V. Neural network approach to solve gas dynamics problems with chemical transformations. *Acta Astronautica*, 180:58–65, 2021 DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.11.058.

2. Nikitin V.F., Karandashev I.M., Malsagov M. Yu, Mikhalchenko E.V. Approach to combustion calculation using neural network. *Acta Astronautica*, 2021. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.10.034.

УЧЕТ ОБОБЩЕННОЙ ПРОИЗВОДНОЙ И КОЛЛЕКТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ФАЗ НА ПРОЦЕСС ГОМОГЕНИЗАЦИИ

Мишин А.В.

Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича, Новосибирск
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск
e-mail: aleksey-mishin94@mail.ru

Одним из важных аспектов при аналитическом моделировании распространения поля по гетерогенной среде является определение эффективных коэффициентов переноса, входящих в осредненные уравнения и отображающих микроструктуру системы (геометрию и физические свойства фаз). Для решения данной задачи необходимо учесть коллективное влияние фаз на распространяющееся исследуемое поле по гетерогенной среде, что имеет отношение к задаче многих тел. Задача многих тел в гетерогенной среде связана с описанием влияния на поле конфигурации внутренних границ, разделяющих занятые фазами области с разными физическими свойствами. Сложность при построении такой модели заключается в поиске математического аппарата, отображающего влияние характерных масштабов фаз в среде и их физических свойств на поведение поля в системе. Широкий математический аппарат, содержащийся в существующих подходах [1], [2], либо не учитывает границы раздела фаз, либо вводит их упрощенно (через феноменологические коэффициенты или периодическую структуру). Это ограничивает возможности анализа влияния микроструктуры гетерогенной среды на распространение поля по ней. В работе проводится получение эффективных коэффициентов переноса гетерогенной среды на основе формализма обобщенной производной, отображающей внутренние границы гетерогенной среды. Формула для обобщенной производной является следствием применения вариационного аппарата к функционалу энергии для гетерогенной среды с учетом индикаторной функции, характеризующей фазу в точке. Впервые обобщенная производная введена в рамках функционального анализа в работе [3], а для анализа гетерогенных сред она впервые введена в работе [4]. На основе полученного модифицированного оператора и проведенного осреднения ищется решение на осредненную функцию Грина. Исходя из анализа интегро-дифференциального уравнения с разрывами и введенных гипотез решение имеет вид потенциала Юкавы, характеризующего с физической точки зрения переходный слой, вызванный экранированием зарядов. Данный потенциал направлен выразить решение задачи многих тел в гетерогенной среде и отобразить коллективное влияние фаз на распространяющееся поле по системе. На основе найденного решения эффективные коэффициенты переноса интегрально учитывают микроструктуру системы в явном виде.

$$\sigma^* = c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2 - \frac{c_1c_2(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{c_1\sigma_2 + c_2\sigma_1 + \frac{3-\gamma}{\gamma}\sigma^*},$$

Эффективный коэффициент переноса, явно содержащий информацию о физических свойствах фаз и их характерных размерах в найденном параметре γ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90090.

1. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
2. Хорошун Л.П. Математические модели и методы механики стохастических композитных материалов // Прикладная механика. 2000. №10 Том 36. С. 30-62.
3. Шварц Л. Математические методы для физических наук / Пер. с франц. М.: Мир, 1965.
4. Мишин А.В. Обобщенная производная и ее использование для анализа микроструктуры гетерогенной среды. SIBJIM, 2021, Т.24, №4, с. 79–96; DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.406.

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В УПРУГОМ СЛОЕ

Мишустова З.П., Солдатов И.Н.

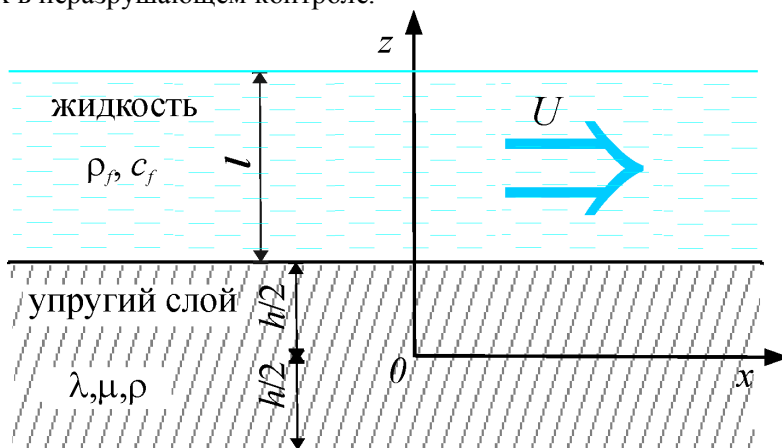
Радиофизический факультет ННГУ имени Н.И. Лобачевского, Н. Новгород

e-mail: mishzlata@gmail.com, erfv@inbox.ru

Рассматривается задача, в которой требуется определить некоторые параметры (такие как давление, скорость потока и пр.) газового (сжимаемой жидкости) слоя, не имея к нему непосредственного доступа. Исследование распространения акустических волн в упругой пластине, погруженной в неподвижную сжимаемую жидкость, ранее проводилось, как правило, в рамках так называемых технических теорий колебаний упругой пластины, причем принималось, что жидкость безгранична в направлении по нормали к пластине.

В данной работе ставится задача определения таких параметров газа, как скорость потока и давление, по изменению характеристик нескольких упругих мод под влиянием газовой нагрузки. Рассмотрение распространения упругих волн ведется на основе общей теории упругости, т.е. для описания колебаний пластины не используются приближения технических теорий, пластина рассматривается с позиции теории упругости как упругий изотропный однородный слой. Слой сжимаемой жидкости с одной стороны ограничен упругим слоем, а с другой жесткой стенкой или свободной поверхностью. Переход к более строгому подходу обусловлен в большей мере необходимостью выяснения характеристик высших мод при движущейся газовой нагрузке, что невозможно сделать в рамках технических теорий. Настоятельность описания высших мод связана с тем, что в неразрушающем контроле удобно использовать (и уже достаточно давно применяются на практике) нормальные волны s_0 , s_1 , a_0 , a_1 , a_2 и, реже, более высокие моды.

Показано, что необходимые параметры можно определить ультразвуковым способом на основе анализа характеристик упругих нормальных волн, причем без использования объемных упругих и (или) акустических волн в газе. В работе найдено дисперсионное уравнение задачи и проведено его исследование, а также построены дисперсионные кривые; полученные в ходе исследования зависимости позволяют вычислить величину скорости потока. Детально рассмотрено влияние скорости потока и давления сжимаемой жидкости на дисперсионные характеристики мод, наиболее часто используемых в неразрушающем контроле.



Движущаяся плотная невязкая газовая среда (сжимаемая жидкость), контактирующая с упругим слоем с одной стороны и имеющая конечную протяженность в направлении, перпендикулярном поверхности слоя.

1. Солдатов И.Н. Нормальные волны в упругом волноводе с приповерхностным слоем, обладающим инерционным сопротивлением, поверхностным натяжением и вязкой реакцией // Процессы в геосредах. 2018. № 2(15). С. 854-861.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШОК БОРА

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Порязов В.А.

Томский государственный университет, Томск

e-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

В докладе представлены результаты численного исследования горения смешанного твердого топлива, содержащего порошок бора. Представлены результаты расчета скорости горения смешанного твердого топлива, содержащего частицы бора, от давления над поверхностью топлива. Постановка задачи основана на сопряженной модели горения смешанного твердого топлива [1] и модели горения порошка бора [2].

Математическая постановка задачи определяется системой уравнений, записанной в декартовой системе координат для области, определяющей процессы в твердом топливе и области на поверхности горения. В твердом топливе решаются уравнение теплопроводности в твердом топливе уравнение разложения окислителя в твердом топливе. В расчетной области, определяющей процессы над поверхностью смешанного твердого топлива, решаются уравнения сохранения массы, импульса и энергии для газа и частиц, баланса массы кислорода, газообразных продуктов реакции, твердого оксида бора в частицах, счетной концентрации частиц и состояния газа. В уравнениях, определяющих математическую постановку задачи, правые части, отвечающие за химическое взаимодействие газа и частиц, определяются через радиус бора в частице, окисление определяется эффективной диффузией через оксидный слой. Слагаемые, определяющие инерционное и тепловое взаимодействие определяются через радиус самой частицы, состоящей на этапе окисления из бора и оксидного слоя, на этапе горения из оголившегося бора. Подробности модели окисления и горения частиц бора приведены в [2].

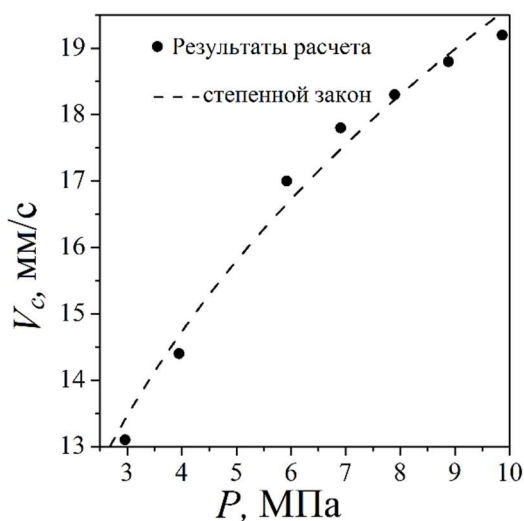


Рис. 1. Зависимость линейной скорости горения смешанного твердого топлива, содержащего полидисперсный порошок бора, от давления газа над поверхностью горения.

Задача решалась численно с использованием методов, аналогичных [2].

На рис. 1 представлена зависимость линейной скорости горения смешанного твердого топлива, содержащего полидисперсный порошок бора, от давления газа над поверхностью горения. Точками представлены результаты численного расчета, сплошной линией аппроксимация расчета степенным законом.

Подробности исследования представлены в работе [3].

Дальнейшее исследование касалось использования PSU-модели для описания процессов окисления и горения частиц бора.

Модель PSU была дополнена допущениями [2] и дала изменения в законе горения частиц бора в составе смешанных твердых топлив.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10054-П).

1. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Расчет скорости горения металлизированного смешанного твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам. Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 568-574.

2. Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Моисеева К. М. и др. Математическое моделирование горения газозвеси порошка бора // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 2. С. 360-371.

3. Порязов В.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Исследование горения смешанного твердого топлива с добавкой порошка бора // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 5. В печати.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗАКРЫТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Кантарбаева А.

Томский государственный университет, Томск

e-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

Численно исследуется горение пропано-воздушной смеси в закрытом узком цилиндрическом канале. Целью исследования является определение формы пламени и видимой скорости горения пропано-воздушной смеси в зависимости от содержания пропана в смеси и радиуса канала.

Модель горения пропано-воздушной смеси основана на модели, представленной в [1]. Математическая постановка задачи описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии с учетом диффузии компонентов смеси, теплопроводности, химического реагирования. Система уравнения записывается в двухмерном приближении в цилиндрических координатах в консервативной форме. Метод решения задачи основан на алгоритме [2].

Результаты расчетов представлены на рис. 1 – 2. Согласно рис. 1 при горении пропано-воздушной смеси с содержанием пропана меньше стехиометрического в закрытом канале радиуса 2 см форма пламени способна меняться за счет сложной картины течения газа, возникающего при его тепловом расширении. Уменьшение объемного содержания пропана с 3.5 % до 3% приводит к снижению видимой скорости распространения пламени. Кроме того, наблюдаемое для 3.5 % смеси изменение формы пламени не было обнаружено для 3% смеси (рис. 1).

Расчет закономерностей горения смеси стехиометрического состава в закрытом канале радиуса 1.5 см (рис. 2) показал возможность формирования тюльпанообразного пламени. Скорость распространения пламени при этом имеет колебательный характер с периодическим ускорением и замедлением пламени.

Подобные результаты для газовых смесей с содержанием горючего близким к стехиометрическому описаны, в частности, в [3].

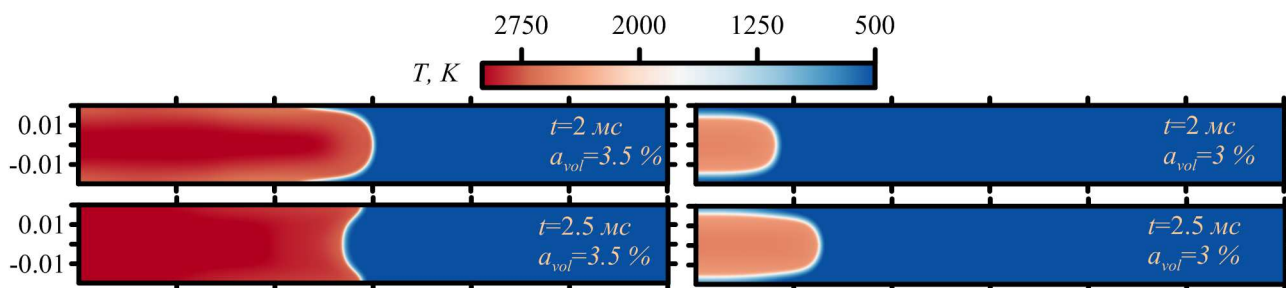


Рис.1 Распределение температуры пропано-воздушной смеси по пространству.

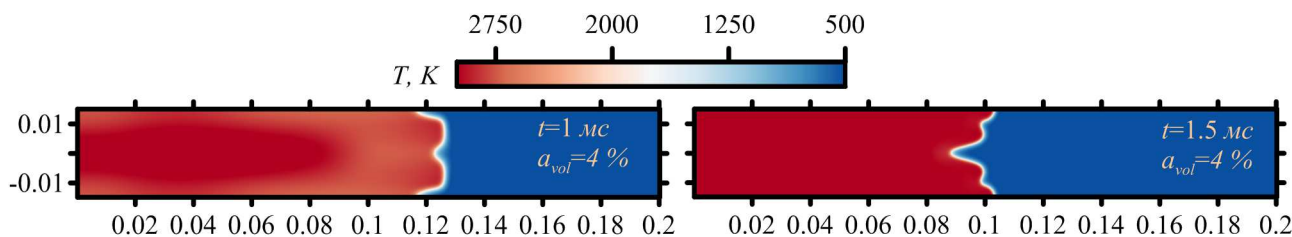


Рис.2 Распределение температуры пропано-воздушной смеси по пространству.

Исследование выполнено за счет стипендии Президента (проект № СП-134.2022.1).

1. Moiseeva K M, Krainov A Yu, Krainov D A Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 696. 012011.

2. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // Journal of Computational Physics. 1979. V.1. No. 32. Pp. 101-136.

3. Алексеев М.М., Семенов О.Ю. Физическое моделирование тюльпанообразного пламени при горении газов в цилиндрической вертикальной трубе // Вестник кибернетики. 2021. Т. 41. №1. С.63-70.

РАЗВИТИЕ КОНВЕКЦИИ ДВОЙНОГО СЛОЯ В ПРОТОЧНОМ МИКРОКАНАЛЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СМЕШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Мошева Е.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
e-mail: mosheva@icmm.ru

В работе экспериментально исследуется процесс смешения потоков в условиях развития конвекции диффузионного слоя (DLC-конвекция) [1]. В неподвижной двухслойной системе смешивающихся жидкостей формирование данной конвекции возможно при условии разной скорости диффузии растворенных в слоях веществ. В этом случае взаимная диффузия слоев сопровождается формированием конвективной неустойчивости в виде пальчиковых структур, распространяющихся в обе стороны от начальной зоны контакта жидкостей. В данной работе мы сосредоточены на изучении DLC-конвекции и ее влиянии на эффективность смешения жидкостей в подвижной двухслойной системе, где жидкости непрерывно прокачиваются в тонком горизонтальном канале.

Микроканал имеет следующие размеры: длина $L = 7.0$ см, высота $d = 0.25$ см, толщина $h = 0.02$ см. С одной стороны канал оснащен смесителем Y-типа. С помощью тонкой трубки каждое плечо смесителя подключено к шприцевому насосу (SPLab02), посредством которого осуществляется непрерывная подача исследуемых жидкостей в канал с заданным расходом. Прокачиваемые жидкости свободно сливаются через отверстие, расположенное на противоположном конце канала. Геометрия смесителя, микроканала и реализация подачи растворов схематически проиллюстрированы на рисунке 1.

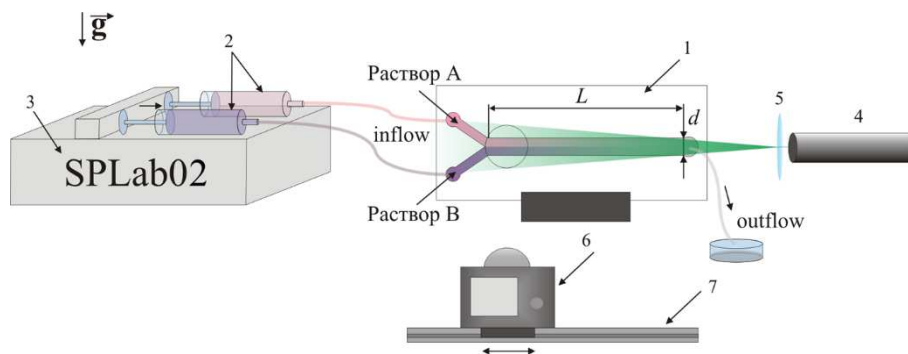


Рис. 1. Схема установки, включающая 1 – проточный микроканал со смесителем Y-типа, 2 – двухканальный шприцевый насос, систему визуализации, используемую для получения полей концентрации родамина: 4 – лазер ($\lambda=532$ нм), 5 – система линз, 6 – камера, установленная на горизонтальном подвижном рельсе 7.

Структура возникающих в канале течений качественно исследована с помощью сдвиговой интерферометрии. Для количественной оценки эффективности смешения потоков использовался метод, основанный на добавлении к одному из растворов флуоресцирующего вещества (родамин В). В ходе эксперимента производилась съемка изображений, характеризующих распределение концентрации родамина, отражающее поле концентрации того вещества, в раствор которого он был добавлен. Математическая обработка полученных полей концентрации позволила количественно оценить степень смешения потоков [2].

В докладе обсуждается эффективность смешения потоков при различной интенсивности DLC-конвекции. Приводится сравнительный анализ с ранее изученными случаями чисто диффузионного смешения и смешением в условиях развития конвекции двойной диффузии [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии президента РФ для аспирантов и молодых ученых (СП-2408.2021.1)

1. Griffiths R.W. Layered double-diffusive convection in porous media // Journal of Fluid Mechanics. 1981. Vol. 102. P. 221-248.

2. Stroock, A.D. et al. Chaotic mixer for microchannels // Science. 2002. Vol. 295. № 5555. P. 647-651.

3. Mizev A.I., Mosheva E.A., Shmyrov A.V. Double-diffusive convection in the continuous flow microreactors // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1945. №. 1. P. 012036.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА ДИНАМИКУ СМЕШИВАЮЩИХСЯ РЕАГИРУЮЩИХ ДВУХСЛОЙНЫХ СИСТЕМ

Мошева Е.А., Козлов Н.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: kozlov.n@icmm.ru, mosheva@icmm.ru

В работе экспериментально исследуется влияние линейно-поляризованных вибраций на структуру и интенсивность конвекции, возникающей в двухслойной системе, образованной водными растворами азотной кислоты и одного из гидроксидов NaOH/KOH, при протекании фронтальной реакции нейтрализации.

Эксперименты проводились в вертикальной ячейке Хеле-Шоу. Рабочая область ячейки имеет следующие внутренние размеры: высота 10 см, ширина 5 см, толщина 0.12 см. Боковые стенки ячейки образованы прозрачными стеклами, что позволило использовать цифровую трассерную анемометрию в качестве основного метода исследования структуры и интенсивности конвекции. Для изучения скорости движения фронта, его формы, а также направления массопотока образующейся вследствие реакции соли, был использован универсальный кислотно-щелочной индикатор, работающий в широком диапазоне значений pH.

Рабочий диапазон концентраций реагентов: $C = (0.5\text{--}3.0)$ моль/л. Варьирование начальных концентраций позволило проводить эксперименты в двух различных режимах реакции: в конвективном (КР) и диффузионном (ДР). Протекание реакции в КР сопровождается возникновением в верхнем слое интенсивной конвекции, обусловленной неустойчивостью Рэлея–Тейлора, что существенно увеличивает как скорость движения фронта, так и скорость самой реакции [1]. В ДР также возникает конвекция, но вследствие развития неустойчивости двойной диффузии [2]. Ее интенсивность на порядок ниже, чем в КР, поэтому массоперенос в данном режиме реакции медленный, что в значительной мере замедляет протекание реакции.

Динамика реакции исследована в условиях: (i) поперечных вибраций, когда вибрационное воздействие ориентировано поперек фронта реакции; (ii) продольных вибраций, когда вибрационное воздействие ориентировано вдоль фронта реакции. Эксперименты выполнялись при частоте вибраций 40 Гц и амплитуде (2–4) мм в случае вертикальных вибраций (i), а в случае горизонтальных вибраций (ii) – в диапазонах частоты и амплитуды (5–13) Гц и (5–15) мм, соответственно.

Обнаружено, что ответ системы на горизонтальные и вертикальные вибрации качественно разный. Первые приводят к отклонению реакционного фронта от горизонтали, тогда как вторые вызывают слабое замедление конвекции [3]. В докладе обсуждаются особенности динамики реакции и устойчивость реакционного фронта при различных ориентациях вибраций. Обсуждается возможность управления массопереносом в реакционных системах. Приводится сравнительный анализ с результатами, полученными в безвибрационном случае.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант 19-11-00133).

1. Bratsun D. et al. Shock-wave-like structures induced by an exothermic neutralization reaction in miscible fluids // *Physical Review E*. 2017. Vol. 96. № 5. P. 053106.
2. Radko T. Double-diffusive convection. Cambridge University Press, 2013.
3. Mosheva E., Kozlov N. Study of chemoconvection by PIV at neutralization reaction under normal and modulated gravity // *Experiments in Fluids*. 2021. Vol. 62. №. 1. P. 1-13.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Нагичева Г.С., Нохрин А.В., Мелехин Н.В., Берендеев Н.Н., Брагов А.М., Баландин В.В.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

e-mail: nagicheva@nifti.unn.ru

В работе проводилось исследование влияния различных способов деформирования на структуру и свойства углеродистой стали У8. Рассматривали образцы в исходном состоянии, после квазистатической осадки на заданную степень деформации, после взрывной и ударной обработок. Структура стали исследовалась с использованием методики металлографии и растровой электронной микроскопии; для аттестации механических свойств использовалась методика измерения микротвердости. Для визуализации изменения физико-механических величин в процессе высокосортного деформирования проводилось моделирование процесса высокоскоростной взрывной обработки углеродистой перлитной стали методом конечных элементов в среде ANSYS.

Микроструктурные исследования показали, что сталь У8 в исходном состоянии имеет микроструктуру пластинчатого перлита. После квазистатической осадки и динамической обработки ударом и взрывом микроструктура стали У8 не претерпевает значительных изменений. Установлено, что динамическое сжатие вызывает незначительное повышение твердости в центральной части образцов. Полученные результаты согласуются с результатами конечно-элементного моделирования.

Показано, что низкотемпературный отжиг (150-500 °C) недеформированной стали У8 приводит к монотонному снижению твердости. Установлено, что квазистатическая осадка и динамическое нагружение углеродистой стали приводят к реализации эффекта деформационного старения, проявляющегося в повышении твердости при отжиге деформированной стали У8. Увеличение степени и скорости деформации сопровождается повышением твердости отожженной стали (см. рис. 1). Показано, что в случае взрывной нагрузки масштаб приращения твердости небольшой, что, по нашему мнению, обусловлено малостью степени деформации стальной заготовки в случае взрывного нагружения.

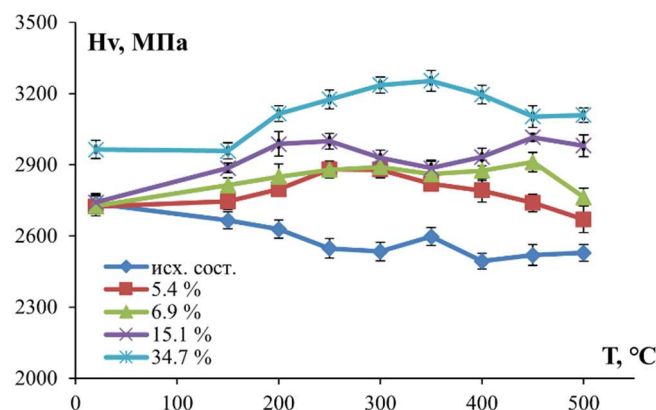


Рис. 1. Зависимость микротвердости стали У8 от температуры отжига в случае квазистатической осадки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект №0729-2020-0060).

1. Nagicheva G.S., Nokhrin A.V., Berendeev N.N., Melekhin N.V., Piskunov A.V., Sysoev A.N. and Gryaznov M.Y. Studying the Impact of Blast Treatment on the Structure and Mechanical Properties of Carbon // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. London: IOP Publishing Ltd, 2021, v.1014, p. 012034.

2. Нагичева Г.С., Нохрин А.В., Мелехин Н.В., Берендеев Н.Н., Брагов А.М., Баландин В.В. Исследование влияния скорости деформации на склонность углеродистой стали У8 к деформационному старению // Проблемы прочности и пластичности. № 2. Т. 84. 2022.

КОЛЕБАНИЯ СТОЛБА ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТОЙ СКВАЖИНЕ И СООБЩАЮЩЕЙСЯ С ПЛАСТОМ, ПОДВЕРЖЕННЫМ ГРП

Насырова Д.А., Башмаков Р.А.

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

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

Рассмотрены собственные колебания столба жидкости в нефтяной скважине, 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 (в частности, коэффициентами проницаемости, качеством перфорации скважины и свойствами образованных трещин ГРП). 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. Показано, что акустическая диагностика, основанная на анализе собственных колебаний в скважине, может служить действенным инструментом для диагностики призабойной зоны скважины.

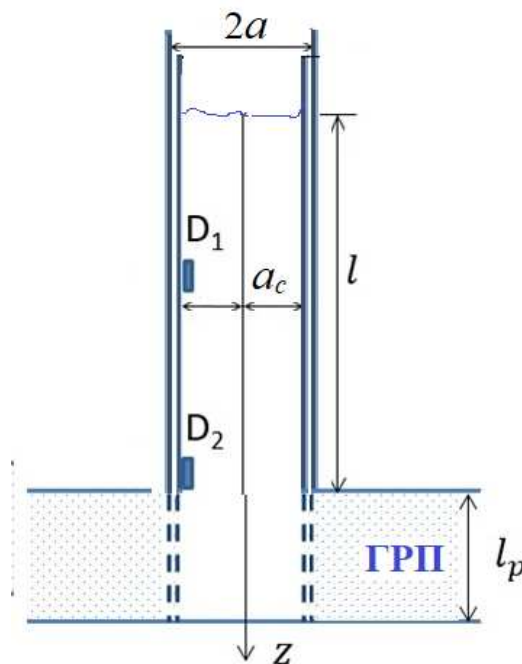


Схема обсаженной скважины, сообщающейся с пластом.

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

1. Wang X., Hovem K., Moos D., Quan Y. Water Hammer Effects on Water Injection Well Performance and Longevity//SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 2008, SPE 112282.

2. Шагапов В.Ш., Башмаков Р.А., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 4 (362). – С. 5-14.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТНОЙ БАНКИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМОМ ГАЗОВОМ ПЛАСТЕ В СКВАЖИНЕ С ТРЕЩИНОЙ ГРП

Ниценко В.А.¹, Давлетбаев А.Я.^{1,2}

¹ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

²Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: nitsenkova@bnipi.rosneft.ru

Образование «конденсатной банки» происходит вследствие конденсации жидких углеводородов и последующей их аккумуляции в призабойной зоне продуктивного пласта. Уменьшение производительности скважин вследствие накопления конденсата отмечалось на месторождениях в нескольких регионах России. В настоящее время все большее внимание уделяется газовым и газоконденсатным месторождениям. Поэтому возникает необходимость исследования основных причин изменения продуктивности скважин с гидроразрывом пласта (ГРП) в низкопроницаемых газоконденсатных пластах [1].

В рамках исследования также проведена проверка сходимость результатов моделирования в гидродинамических симуляторах ПК «РН-КИМ» и «ECLIPSE». По результатам моделирования для композиционной модели получена удовлетворительная сходимость.

В данной работе для исследования свойств конденсатной банки, была построена композиционная модель со скважиной с трещины ГРП (в т.ч. без ГРП) – при добыче газа отмечается образование «конденсатной банки». Проведено сравнение образовавшихся конденсатных банок при разных режимах работы. Показано, что в призабойной зоне пласта падает пластовое давление, что приводит к более сильному накоплению конденсата в этой зоне. Вследствие снижения давления в околоскважинной зоне начинается осаждение конденсата. При этом вблизи скважины проницаемость газа резко снижается.

Проведен анализ синтетических кривых восстановления давления (КВД) в остановленной скважине после этапа добычи. Смоделированы синтетические гидродинамические исследования скважин (ГДИС) методом КВД для скважин без ГРП. В этом случае, сначала идет режим с контролем по добыче 300.000 м³/сут, с переходом на контроль по давлению 400 атмосфер, 300 атмосфер, 200 атмосфер. По Log-Log графику КВД для скважины без ГРП в симуляторе ГДИС «РН-ВЕГА» (рис 1), можно видеть, что радиус конденсатной банки равен ~70 м (рис.1). При этом пьезопроводность в околоскважинной области (в скважине без трещины ГРП) уменьшается от 2 до 5 раз и на расстояниях до ~ 4 метров. Также были смоделированы синтетические КВД для скважины с трещиной ГРП. Однако в этом случае признаки конденсатной «банки» на Log-Log графике не диагностируются. При этом было отмечено, что безразмерная проводимость трещины снижается в зависимости от интенсивности добычи газа.

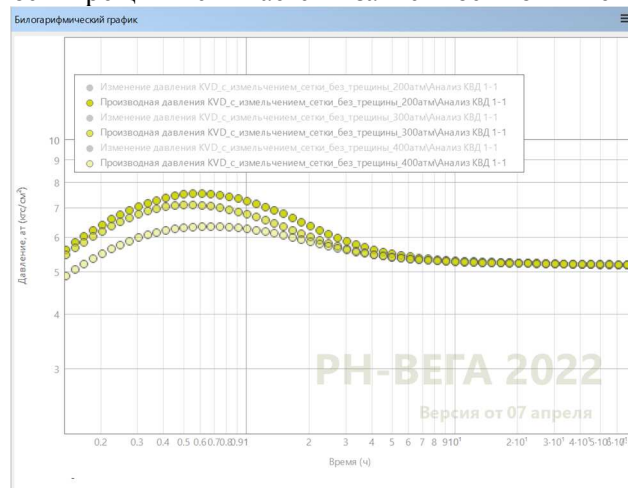


Рис. 1. Log-Log графики изменения давления и ее логарифмической производной КВД для скважины без трещины ГРП.

1. Сидоров А.В., Промзелев И.О., Туленков С.В., Семенов В.Н. Оценка влияния "конденсатной банки" на продуктивность скважины с гидроразрывом пласта ачимовских отложений // Нефтяное хозяйство, 2010, май, С. 87-89.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ЦИАТИМ-221

Каменских А.А., Носов Ю.О.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: anna_kamenskih@mail.ru, ura.4132@yandex.ru

В качестве механической модели смазочного материала, в обычных условиях, выступает классическая ньютоновская среда. В работе [1] показано, что смазочный материал может трансформироваться в тело Максвелла.

Для прогнозирования длительной работы конструкции, с использованием смазочного материала, предложен ряд моделей, которые учитывают как упругую, так и вязкую составляющую материала. В данной работе рассмотрено 2 модели: вязкоупругая модель Prony, и вязкоупругопластическая модель Anand. Anand, в отличие от традиционных подходов ползучести, в своей модели, вводит скалярную переменную – сопротивление деформации, которая используется для представления изотропного сопротивления неупругому течению материала. В качестве материала исследования выбрана смазка ЦИАТИМ-221.

Смазочный материал ЦИАТИМ-221 предназначен для смазывания узлов трения. В соответствии с ГОСТ 9433-80 смазочный материал имеет ряд характеристик: рабочие температуры от -60 до $+150$ °C; эффективная вязкость при температуре -50 °C не более 800 Па*с; предел прочности смазочного материала не менее 120 Па [2]. Помимо этого, смазочный материал обладает тиксотропными свойствами, что позволяет ему в покое восстанавливать свою структуру в течение продолжительного времени.

Работа направлена на создание численной процедуры по поиску неизвестных коэффициентов для описания модели поведения смазочного материала. Поиск неизвестных основан на методе Нелдера-Мида с многопараметрической параметризацией, путем минимизации невязки между экспериментальными и численными данными. Рис. 1. результаты численного моделирования модели Prony в сравнении с данными натурных экспериментов [2].

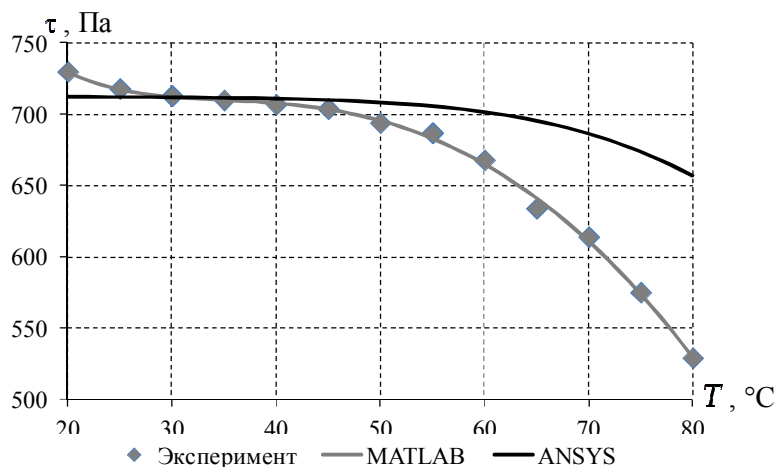


Рис.1. Зависимость касательных напряжений от температуры при использовании модели Prony.

Численный эксперимент на чистый сдвиг выполнен в прикладном пакете ANSYS Mechanical APDL. На основе полученных данных можно сделать вывод, что вязкоупругая модель Prony не подходит в качестве модели для описания смазочного материала.

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

1. Бердичевский Е.Г. Реологические свойства смазочных материалов при тяжелых режимах граничного трения // Вестник Новгородского государственного университета. 2017. №7(103). С. 40-43.

2. Нечаева А.В. Реологические свойства смазки ЦИАТИМ-221 // Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края». 2016. С. 67-71.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА РЯДОВ УГЛУБЛЕНИЙ ПОД СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ В ВИДЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЛУНОК ПОЛИМЕРНОЙ ПРОСЛОЙКИ ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОСТОВ

Каменских А.А., Носов Ю.О., Струкова В.И.

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

В работе [1] проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния и контактных параметров прослойки опорной части мостовых сооружений с углублениями под смазочный материал разной геометрии (кольцевые канавки; сферические лунки). Установлено, что сферические лунки имеют ряд преимуществ по сравнению с кольцевыми канавками. Исследование влияния количества рядов углублений под смазочный материал и расстояния между ним выявлено, как одна из актуальных задач анализа работоспособности конструкций.

Антифрикционный материал полимерной прослойки – модифицированный фторопласт. Поведение материала описывается в рамках деформационной теории пластичности [2]. Смазочный материал, в первом приближении, моделируется, как мало сжимаемое тело, с коэффициентом Пуассона 0,49999. Фрикционные свойства контактных пар материалов: сталь-полимер 0,04; сталь-смазка 0,01[3] – справочные.

При проведении численных экспериментов создана процедура автоматизации процесса моделирования углублений под смазочный материал в виде сферических лунок в рамках итерационной процедуры и обработки результатов исследований.

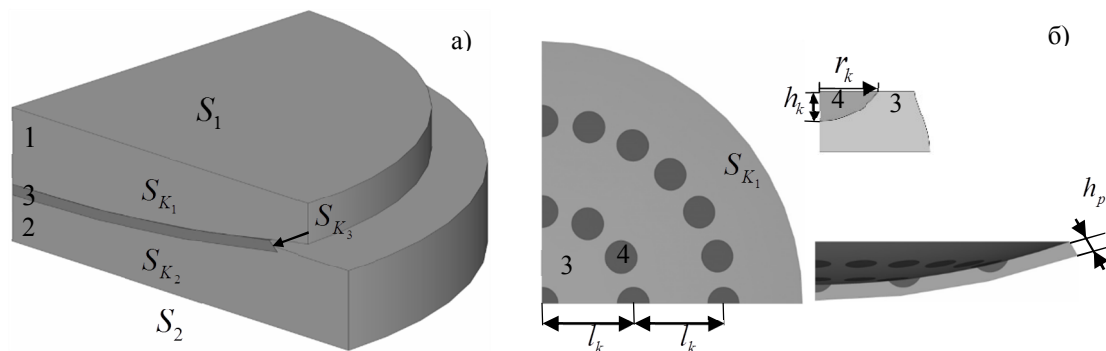


Рис. 1. Расчетная схема опорной части: а) упрощенная расчетная схема опорной части; б) полимерная прослойка с углублениями под смазочный материал в виде сферических лунок 1, 2 – верхняя и нижняя стальные плиты; 3 – полимерная прослойка; 4 – смазочный материал.

Рассматривается четверть конструкции, на поверхность S_1 приложена нагрузка $\sim 55,5$ МПа, на поверхности S_2 запрещены вертикальные перемещения. На поверхностях $S_{K_1} - S_{K_3}$ реализовано фрикционное сопряжение элементов с заранее неизвестным характером распределения статусов контакта (проскальзывание, прилипание, отлипание). Геометрические характеристики полимерной прослойки: толщина $h_p = 4$ мм, расстояние между лунками l_k варьировалось от 12 до 28 мм. Сферические лунки: $h_k = 2$ мм – максимальная глубина; $r_k = 4$ мм – радиус.

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

1. Каменских А.А., Носов Ю.О. Влияние местоположения и геометрии углублений под смазку опорной части на деформирование конструкции // Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности». – 2022. – С. 418-422.

2. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities interaction of elements contact spherical unit with the antifrictional polymeric interlayer// Journal of Friction and Wear. – 2015. – №36(2). – P. 170-176.

3. Лужнов Ю.М., Калачев Ю.Н., Александров В.Д., Морщилов М.В. Смазка и смазочные материалы (трибологические аспекты смазки). – М.: МАДИ, 2019. – 40 с.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЧЕТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ОТ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА

Каменских А.А., Панькова А.П., Носов Ю.О.

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

Исследование влияния различного рода воздействий на деформационное поведение опорных частей мостовых сооружений в частности и всей конструкции в целом является актуальной задачей. Анализ долговечности, реакции моста на воздействие сейсмических нагрузок [1], модернизация ответственных узлов мостостроительных конструкций [2-3] и другие проблемы активно исследуются учеными и инженерами по всему миру.

Ранее научной группой рассматривались различного рода задачи: влияние толщины и трибологических свойств антифрикционной прослойки [2], расположения слоя скольжения относительно стальных плит [3] на деформационное поведение сферической опорной части при учете только вертикальной нагрузки. Однако данное решение не даёт полной картины поведения антифрикционной прослойки под воздействием нагрузки от мостового пролёта.

Работа направлена на анализ влияния сочетания вертикальной и горизонтальной нагрузок 1000 и 30 кН соответственно. Рассматривается сферическая опорная часть производства ООО «АльфаТех» г. Пермь (рис. 1) в трехмерной постановке.

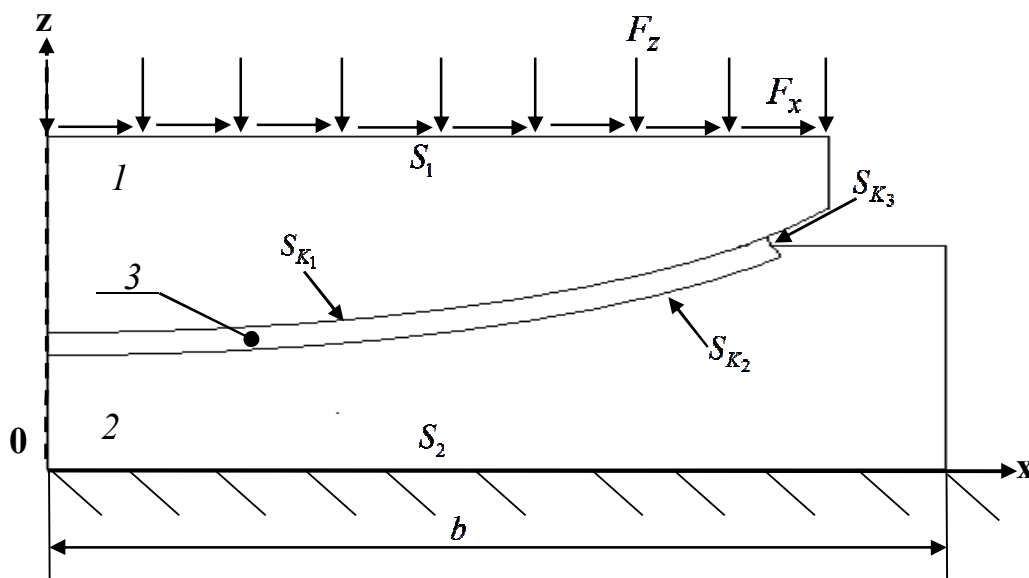


Рис.1. Сферическая опорная часть.

Для реализации численного эксперимента используется прикладной пакет ANSYS Mechanical APDL. В ходе решения были получены зависимости контактных параметров и деформационных характеристик при совместном действии вертикальной и горизонтальной нагрузок.

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

1. Moeindarbari H., Taghikhany T. Seismic optimum design of triple friction pendulum bearing subjected to near-fault pulse-like ground motions // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2014. – Vol. 50. – P. 701-716.

2. Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 15-26.

3. 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.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАЛОМОДОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМО ПАРКЕРА

Окатьев Р.С.^{1,2}, Фрик П.Г.^{1,2}, Соколов Д.Д.^{3,4}

¹Институт механики сплошных сред, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

³Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

⁴ИЗМИРАН, Троицк, Москва

e-mail: okatev.r@icmm.ru

11-летний цикл солнечной активности является наиболее известным примером проявления периодического характера изменения солнечных магнитных полей. Физическая природа этого цикла связана с крупномасштабным возбуждением магнитного поля (волной квазистационарного магнитного поля), которое распространяется в обоих полушариях от средних широт к экватору. Модель, описывающая это явление, была предложена Паркером [1].

Тем не менее, наблюдаемая солнечная активность выражается не только в существовании 11-летнего цикла, но и в наличии вариаций активности в диапазоне от нескольких месяцев до десятилетий. Наблюдаемый спектр солнечной активности является заполненным с выделенным пиком, соответствующим 11-летнему циклу. Изначально природа непрерывного спектра связывалась с возбуждением большого числа степеней свободы, однако позже было показано, что странные аттракторы, возникающие в маломодовых системах, также могут воспроизводить заполненный спектр.

В работе исследуется маломодовая модель динамо Паркера, которая получается из полной модели разложением полей в ряды Фурье с учетом симметричных соображений и последующим обрезанием разложения на некотором конечном числе мод. В данном случае рассматривается четырехмодовое приближение, содержащее по две моды полоидального и тороидального магнитных полей. Ранее было показано [2], что такая система воспроизводит различные режимы (стационарные решения, осцилляции, динамо-всплески, вассилляции, хаотические режимы).

В работе показано, что поведение системы определяется единственным управляющим параметром. В зависимости от управляющего параметра построена карта режимов и определен интервал значений параметра, в котором система демонстрирует хаотическое поведение. Показано, что рассматриваемая маломодовая модель позволяет получать спектры, качественно похожие на наблюдаемые для солнечной активности. Такие спектры содержат один выделенный пик, а также один или несколько вторичных пиков в области низких частот. Также было обнаружено, что в области хаотического поведения системы существуют интервалы различной ширины, в которых система возвращается к периодическому поведению. Стоит отметить, что существование таких «включений периодичности» известно для знаменитой системы Лоренца. Для демонстрации сложной структуры зоны хаотического поведения системы построена зависимость введенной меры хаотичности системы от управляющего параметра.

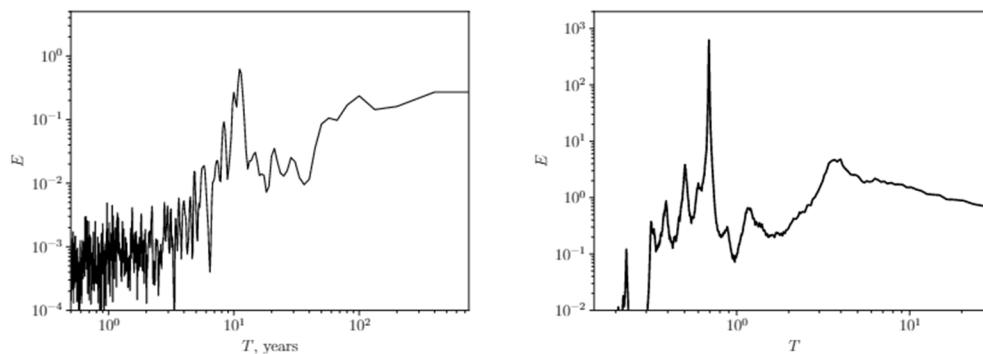


Рис. 1. Наблюдаемый спектр солнечной активности (слева) и спектр первой моды тороидального магнитного поля в режиме хаотического поведения маломодовой модели (справа).

1. Parker E.N. Hydromagnetic dynamo models // *Astrophysical Journal*. 1955. V. 122. P. 293-314.
2. Нефедов С.Н., Соколов Д.Д. Нелинейная маломодовая модель динамо Паркера // *Астрономический журнал*. 2010. Т. 87. №3. С. 1-8.

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ МАЛЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АСИМПТОМНЫХ АНЕВРИЗМ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ КРИТЕРИЯ РИСКА ИХ РАЗРЫВА

Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Дубовой А.В., Бервицкий А.В., Паришин Д.В.
Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
e-mail: danilo.skiman@gmail.com

В современной нейрохирургии важное место занимают малые асимптомные аневризмы. Такие аневризмы сложно обнаружить даже в ходе томографии головного мозга и еще сложнее определить морфологические и гидродинамические предпосылки к оперированию таких аневризм, учитывая, что риск развития послеоперационных осложнений соотносим с риском разрыва аневризмы [1]. Численные методы гемодинамики – это один из немногих инструментов, способных количественно оценить подобные риски [2]. Одним из наиболее распространенных рисков критериев проведения операции является так называемый критерий PHASES, сочетающий в себе как информацию о морфологических параметрах аневризм, так и об их гидродинамике [3]. Однако, критерии, присутствующие в данном критерии довольно грубо делят выборку (например, возрастной) и не позволяют обеспечить удовлетворительной точности прогнозирования для повсеместного клинического применения.

В данной работе рассматриваются 15 пациентов которые имеют асимптомные аневризмы сосудов головного мозга и доступен ряд DICOM изображений, полученных в ходе КТ-ангиографии от момента обнаружения аневризмы до настоящего момента. Выполнен анализ изменения как морфологических, так и гидродинамических параметров структуры сосудов головного мозга этих добровольцев. Результаты данного исследования будут применены для уточнения рисков критерия PHASES.

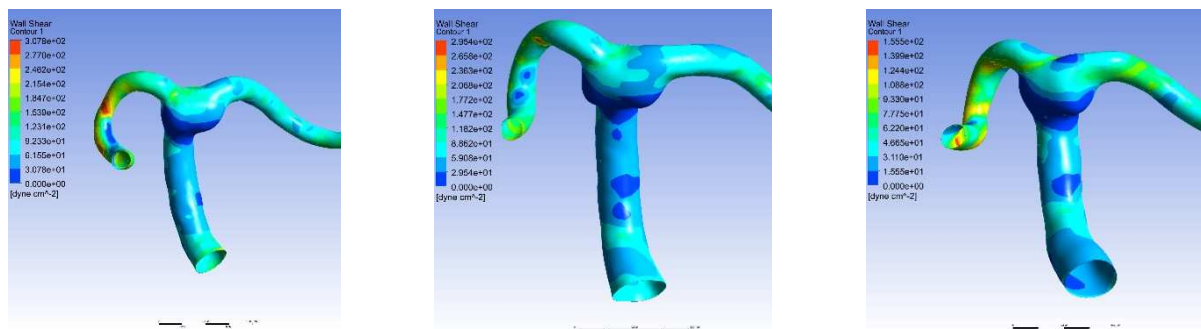


Рис. Эволюция одной из наблюдаемых аневризм слева-направо 2017, 2019 и 2021 гг.. Цветом показаны значения WSS (происходит падение максимальных значений $3.07 \rightarrow 2.954 \rightarrow 1.555$ Па).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 20-71-10034. Коллектив авторов благодарит ФНЦ (Новосибирск) за сотрудничество в рамках данного проекта.

1. International Study Of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial aneurysms—risk of rupture and risks of surgical intervention. New England Journal of Medicine 339, 1725–1733, <https://doi.org/10.1098/rsos.180780> (1998).

2. D. Tikhvinsky et al. Numerical Assessment of the Risk of Abnormal Endothelialization for Divulter Devices: Clinical Data Driven Numerical Study, J. Pers. Med. 2022, 12, 652. <https://doi.org/10.3390/jpm12040652>.

3. JP Greving et al. Development of the PHASES score for prediction of risk of rupture of intracranial aneurysms: a pooled analysis of six prospective cohort studies, The Lancet Neurology, Volume 13, Issue 1, January 2014, Pages 59-66, 10.1016/S1474-4422(13)70263-1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИИ ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ И ОБСТАНОВОК ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РАЗМЕЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Пенигин А.В.¹, Афанасьев А.А.², Беловус П.Н.¹, Дымочкина М.Г.¹, Веденеева Е.А.²,
Гречко С.С.², Павлов В.А.¹

¹ ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург

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

e-mail: penigin.av@gazpromneft-ntc.ru

Одним из наиболее ответственных этапов в проектах CCUS (carbon capture storage and utilization – улавливание, размещение и использование углекислого газа), определяющим его будущую производительность (как по приемистости, так и по объему), капитальным затратам и объему мониторинговых мероприятий, является этап скрининга и отбора. В ходе этой оценки выбирается набор перспективных участков или один участок для дальнейшего геологического изучения, когда на сейсморазведку, бурение и лабораторные работы тратится значительная сумма денег. Помимо разработки сложной системы критериев выбора объектов для безопасного и надежного длительного хранения углекислого газа в зависимости от объема потенциального хранилища и существующих геологических предпосылок необходимо провести оценку чувствительности основных параметров процесса размещения для качественной оценки альтернатив в процессе выбора. Кроме того, такой анализ позволит оценить требования к точности и количеству исследований при проведении геологоразведочных работ исходя из их влияния и, следовательно, их ценности.

Для оценки была проведена серия расчетов на гидродинамических моделях для количественной оценки влияния параметров и вариантов использования опций на результаты. Входные параметры включали: пористость, проницаемость, анизотропию, однородность, толщины, угол залегания, температуру; параметры фазовых проницаемостей (концевые точки, степенные параметры N_w и N_g для модели Кори), сжимаемость породы, величину капиллярного давления; содержание азота и метана в потоке закачки для моделирования проектов размещения CO_2 и увеличения нефтеотдачи, соответственно; параметры диффузии, дисперсии и гистерезиса.

Вариации этих параметров привели к разным результатам с точки зрения:

- длины и ширины шлейфа; относительного вклада механизмов улавливания углекислого газа в пласте на различных стадиях жизненного цикла проекта; эффективности хранения (в пересчете на занимаемую площадь и количество закачиваемого CO_2); площади и мощности шлейфа, где насыщенность CO_2 выше 0,3 для надежного обнаружения сейсморазведкой 4D или ВСП.

Результаты исследования позволяют сделать обоснованное предположение о том, какой из перспективных комплексов размещения парникового газа будет лучшим выбором, принимая во внимание площадную эффективность (которая определяет требуемый размер лицензии, особенно в случае хабирования) и относительный вклад каждого из механизмов улавливания (в пользу растворимости CO_2 и гидродинамического улавливания).

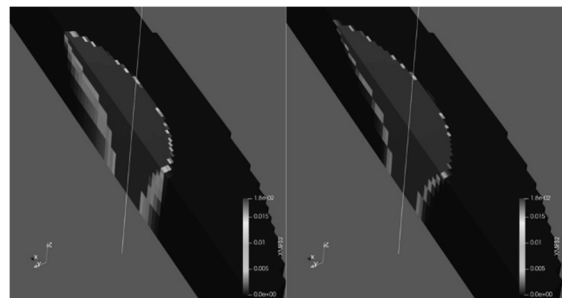


Рис. 1 Разница в растворимости CO_2 в воде при включенной/выключенной опции диффузии.

Более того, из анализа стало очевидно, что диффузию (см. рис 1), поперечную и поперечную дисперсию также необходимо учитывать при предварительном моделировании, поскольку они позволяют прогнозировать поведение шлейфа CO_2 . Таким образом, на этапе скрининга и выбора команда CCUS-проекта может принять более обоснованное решение о том, какой комплекс хранения будет подходящим выбором для этапа разведки, используя эти результаты и разработанный подход к моделированию.

1. Cavanagh A., Benchmark calibration and prediction of the Sleipner CO_2 plume from 2006 to 2012 // Energy Procedia, - 2013. – Vol. 37. P. 3529 – 3545.

2. Afanasyev A., Vedeneeva E., Compositional modeling of multicomponent gas injection into saline aquifers with the MUFITS simulator // Journal of Natural Gas Science and Engineering, - 2021.

ВЛИЯНИЕ СГИБАНИЯ ПАЛЬЦЕВ РУКИ НА КОМПРЕССИЮ СРЕДИННОГО НЕРВА В ЗАПЯСТНОМ КАНАЛЕ

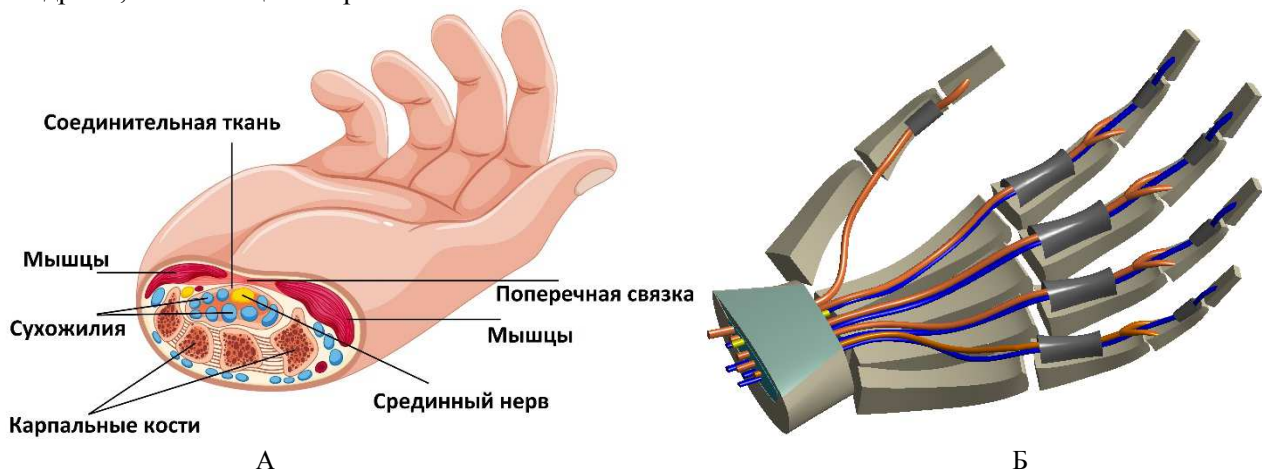
Пешин С.Е.

Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь
e-mail: sapeshin@yandex.ru

Туннельные невропатии составляют от 23% до 40% всех заболеваний периферической нервной системы. Среди них самым частым является синдром запястного канала или карпальный туннельный синдром. Основной причиной появления боли в кисти при туннельном синдроме является компрессия срединного нерва в области запястного канала. В норме в положении покоя кисти давление внутри запястного канала не превышает 5 мм рт. ст. При карпальном туннельном синдроме это давление увеличивается и вызывает отёк срединного нерва, что приводит к увеличению его площади поперечного сечения. При этом нарушается кровообращение и проводимость нервного волокна. В результате это приводит к ишемии нерва и полной потере проводимости нервного сигнала.

На данный момент существует три метода исследования карпального туннельного синдрома – это магнитно-резонансная томография, ультразвуковое исследование и электромиография. Первые два метода дают изображения мягких и твёрдых тканей, по которым можно судить о их геометрических размерах. Третий метод является «Золотым стандартом» диагностики и определяет проводимость электрического сигнала срединным нервом. С помощью электромиографии можно определить место компрессии нерва. При этом ни один из описанных методов не даёт представления о давлении внутри запястного канала.

Целью работы является создание математической модели [1] позволяющей рассчитать давление в запястном канале в норме и при патологии на основании законов механики. Такая модель позволит определить влияние множества механических факторов на развитие карпального туннельного синдрома, а также оценить риски его появления.



А) Анатомия запястного канала. Б) Расчётная модель.

На основании геометрических размеров, взятых с магнитно-резонансных снимков построена упрощённая объёмная модель, включающая в себя запястный канал, поперечную связку, глубокие и поверхностные сухожилия сгибателей пальцев, карпальные кости, фаланги пальцев кисти и срединный нерв (рис.). Таким образом, задача представлена математическими уравнениями и решается в пакете программ Ansys.

Получены поля распределения перемещений, деформаций и напряжений по всей области моделирования, включая срединный нерв при сгибании пальцев кисти без нагрузки и с нагрузкой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20067, <https://rscf.ru/project/22-21-20067>.

1. Пешин С.Е., Каракулова Ю.В., Няшин Ю.И. Синдром запястного канала с точки зрения биомеханики. Обзор литературы // Российский журнал биомеханики. 2022. Т. 27. №2.

ГИБРИДНЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Петрушов А.А.^{1,2}, Краснопольский Б.И.²

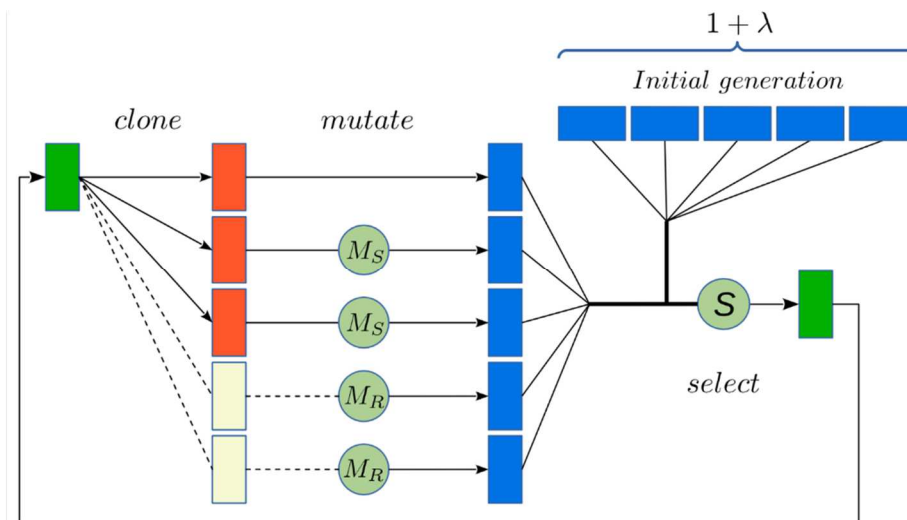
¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

e-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

Процесс численного моделирования задач математической физики включает несколько стадий, эффективность проведения которых влияет на итоговую скорость решения задачи. Одна из таких стадий – решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Оптимальная конфигурация методов, применяемых для решения СЛАУ, зависит от типа решаемого дифференциального уравнения, численной схемы и иных факторов. Важную роль играют также настроечные параметры этих методов, которые могут значительно влиять на скорость решения СЛАУ.

В работе предложен гибридный эволюционный алгоритм для настройки параметров методов решения СЛАУ. Алгоритм основан на эволюционной стратегии [1] вида $(1+\lambda)$ -ES, эффективность которой повышается за счет использования модели полносвязной нейронной сети. Нейронная сеть способна оценивать время решения тестовой СЛАУ по заданным параметрам методов, и обучается на статистике многократных решений системы. Общая схема алгоритма представлена на рисунке.



Структура оптимизационного алгоритма.

Предложенный алгоритм протестирован на ряде задач решения СЛАУ. В частности, использованы системы уравнений из набора Suite Sparse Matrix Collection, широко используемого для тестирования методов решения систем линейных алгебраических уравнений, и системы уравнений для уравнения Пуассона, возникающие при моделировании турбулентных течений [2]. Показана эффективность гибридизации алгоритма, получены оценки размера выборки решений, необходимых для обучения модели нейронной сети. Проведенные тесты показали, что оптимизация параметров для матриц из Suite Sparse Matrix Collection обеспечивает, в среднем, двухкратное ускорение времени решения, а для отдельных систем ускорение составило более 3 раз. Применение оптимизационного алгоритма при моделировании турбулентных течений также позволяет на 30% сократить время проведения расчетов, а также существенно упростить сам процедуру моделирования.

Работа поддержана грантом РНФ № 18-71-10075.

1. Beyer H., Schwefel H. (2002). Evolution strategies - A comprehensive introduction. Natural Computing. 1. 3-52. 10.1023/A:1015059928466.

2. Petrushov A., Krasnopol'sky B. (2021). Advanced Genetic Algorithm in the Problem of Linear Solver Parameters Optimization. 10.1007/978-3-030-92864-3_23.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ШЕСТИЛОПАСТНОГО ВОЗДУШНОГО ВИНТА НА БАЗЕ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

Бельчихина А.В., Пигусов Е.А., Кузин С.А.

Центральный аэрогидродинамический институт имени Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский
e-mail: pigusoff@gmail.com

Исследование интерференции работающего воздушного винта и планера самолета, несмотря на долгую историю эксплуатации винтовых самолетов различных классов не теряет свою актуальность [1]. На современном этапе исследований большое внимание уделяется применению численных методов в процессе аэродинамического проектирования винтовых самолетов и воздушных винтов, но в тоже время для подтверждения достоверности проводимых расчетов требуется проведение процедуры валидации с использованием экспериментальных данных.

В данной работе представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных результатов исследования изолированного шестилопастного воздушного винта (ВВ). Расчётные исследования обтекания изолированного ВВ, экспериментальные исследования которого проводились в большой дозвуковой аэродинамической трубе, выполнены с использованием программы на базе численных решений уравнений Навье-Стокса в квазистационарной постановке. Расчетные исследования характеристик винта проведены с использованием двух расчетных областей, при этом область с ВВ вращается с постоянной угловой скоростью внутри стационарной области [2, 3]. ВВ выполнен в масштабе 1:4.5 от натурных размеров. ВВ установлен на обтекаемой мотогондоле и его основание скрыто за коком. Изолированный шестилопастной ВВ исследован при фиксированном нулевом угле атаки и изменении скорости набегающего потока в диапазоне $V = 10 \div 80$ м/с. Также были фиксированными число оборотов винта $n = 5400$ об/мин и угол установки лопасти $\varphi = +30^\circ$.

Представлено сравнение следующих расчётных характеристик изолированного ВВ с результатами эксперимента: коэффициент полезного действия η ; коэффициент тяги α ; коэффициент мощности β . Показано, что результаты расчёта хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 1). При изменении скорости набегающего потока в диапазоне $V = 18 \div 80$ м/с, погрешность расчета не превышает 2%. На малых скоростях потока по всем характеристикам наблюдаются наилучшие совпадения. Однако при увеличении относительной поступи винта λ возникают некоторые расхождения с экспериментом для коэффициентов тяги α и мощности β .

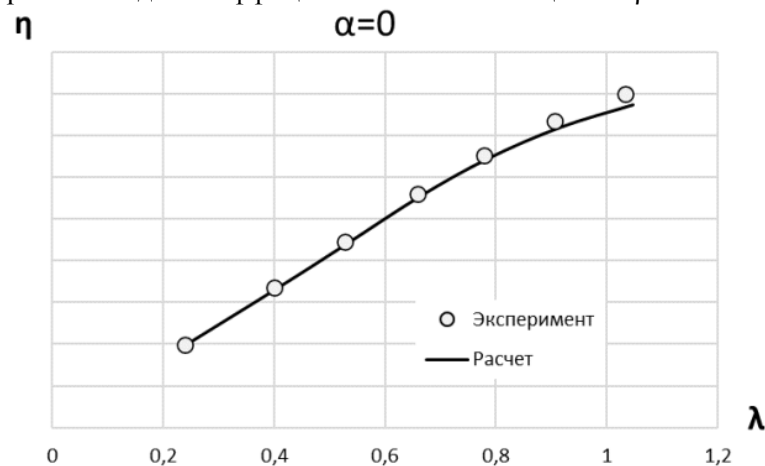


Рис.1 Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета.

1. Chernousov V.I., Krutov A.A., Pigusov E.A. Features of flow around transport aircraft model with running propellers by modelled engine failure in wind tunnel // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference PhysicA.SPb/2021" 2021. С. 012206. DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012206.

2. Виноградов О.Н., Корнушенко А.В., Павленко О.В., Петров А.В., Пигусов Е.А., Чинь Т.Н. Особенности интерференции воздушного винта и крыла сверхбольшого удлинения в неоднородном потоке // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 7-19.

3. Кажан А.В., Кажан В.Г., Кузин С.А. Численные исследования особенностей обтекания воздушного винта и его интерференция с крылом // Материалы XXXI Научно-технической конференции по аэродинамике. 2020. С. 115-116.

ОПИСАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Подседерцев А.Н., Кондратьев Н.С.

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

В настоящее время в промышленности актуальной является проблема создания функциональных материалов с повышенными механическими характеристиками. Значительная часть деталей и конструкций изготавливается с применением термомеханической обработки, которая сопровождается существенным изменением микроструктуры. Наиболее перспективным для описания эволюции структуры в процессе деформирования является применение многоуровневых физически-ориентированных моделей [1].

В работе предложена модифицированная статистическая многоуровневая модель для описания термомеханической обработки поликристаллов с учетом динамической рекристаллизации [2]. Модификация модели заключалась в способе описания эволюционирующей зеренной структуры. Начальная зеренная структура поликристалла, передаваемая в расчетный модуль модели, генерируется с использованием метода, основанного на полиэдрах Лагерра, реализуемого в пакете Neper. Входными параметрами для генерации полиэдрической структуры являются распределение размеров и сферичности зерен. Каждый многогранник структуры описывает зерно. В статистической модели для описания рекристаллизации каждому зерну присваивается набор субзерен. В результате выполнения критерия рекристаллизации, субзерно, расположенное вблизи большеугловой границы, рассматривается как новое зерно, но без учета геометрической формы. Критерий заключается в том, что уменьшение локальной объемной энергии за счёт устранения дефектов должно превосходить увеличение зернограницной энергии в результате увеличения границы. Одной из главных задач модели было перестроение зеренной структуры при описании динамической рекристаллизации, в результате которой меняется форма зерен, размеры и их количество (рис.1). При достижении критического значения объемной доли рекристаллизованного материала повторно проводится генерация полиэдрической структуры с учетом новых зерен в Neper. После этого данные о структуре передаются обратно в расчетный модуль статистической модели, где проводится сопоставление зерен с использованием направленного перебора методом генетического алгоритма.

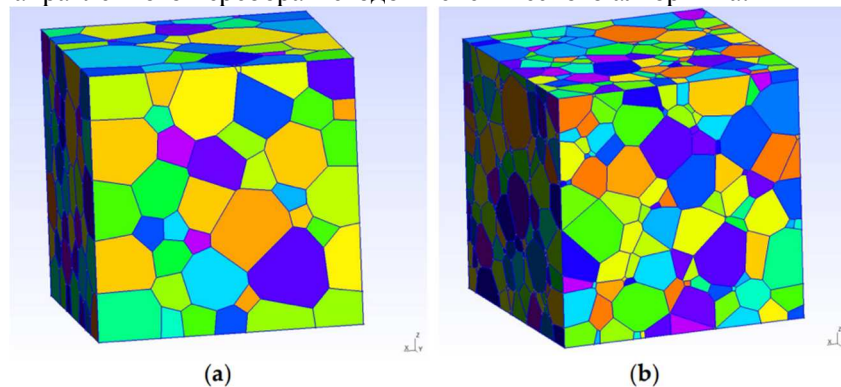


Рис. 1. Начальная зеренная структура материала (а) и после перестроения с учетом новых зерен (б).

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. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019.

2. Trusov P., Kondratiev N., Podsedertsev A. Description of Dynamic Recrystallization by Means of an Advanced Statistical Multilevel Model: Grain Structure Evolution Analysis // Crystals. 2022. Т. 12. №5. С. 653.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКОМКАННОГО ГРАФЕНА ДВУХ МОРФОЛОГИЙ

Полякова П.В., Баимова Ю.А.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

e-mail: polina.polyakowa@yandex.ru

В последнее время значительное внимание исследователи уделяются скомканному графену – новому типу углеродного волокна, состоящему из множества монослоев смятых листов графена, поскольку подобные соединения обладают высокой прочностью и малым весом. В данной работе методом молекулярной динамики исследован скомканный графен двух морфологии, проведен анализ влияния структурных особенностей на механические свойства, такие как предел прочности и модуль Юнга.

В качестве исходной структуры выбран скомканный графен двух различных морфологий. Структура А – чешуйки одной и той же формы, одинакового размера (монодисперсная), структура Б – графеновые чешуйки разных размеров и форм (полидисперсная). Для получения структуры близкой к реальной форме чешуек этот образец выдерживается при комнатной температуре в течение 100 пс. Далее применяется гидростатическое сжатие ($\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon$) при 300 К. Для исследования механических свойств рассматриваемых структур проводится одноосное растяжение вдоль осей x , y и z с постоянной скоростью деформации $0,005 \text{ пс}^{-1}$. Все расчеты проводятся с использованием пакета LAMMPS и межатомного потенциала AIREBO [1].

На рис. 1 для сравнения представлены кривые напряжение-деформация для одноосного растяжения вдоль оси x для двух структур. Это направление растяжения было выбрано в качестве показательного, поскольку все полученные кривые напряжение-деформация (вдоль осей x , y , z) аналогичны, то есть материал изотропный.

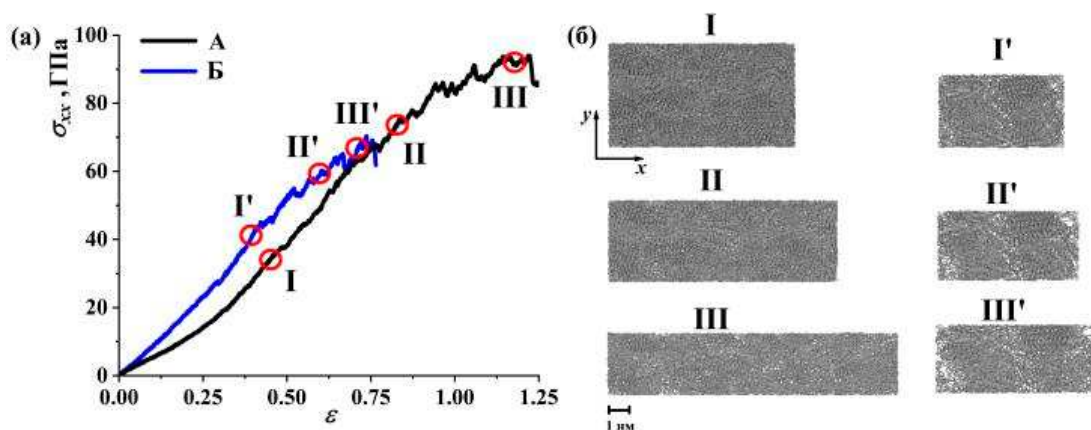


Рис. 1. (а) Кривые напряжение–деформация при одноосном растяжении вдоль направления x для скомканного графена двух морфологий. (б) Структуры в критических точках.

Видно, что существует значительная разница в деформационном поведении этих двух структур. Монодисперсная структура А имеет почти в два раза большую критическую деформацию и предел прочности, что можно объяснить тем, что все чешуйки в процессе сжатия объединились в более однородную структуру, а равенство чешуек (по размерам) позволило получить гораздо больше sp^3 -связей на краях чешуек.

Установлено, что при неупругой деформации монодисперсный смятый графен обладает более высокой прочностью и может растягиваться до больших удлинений. Для двух структур были получены достаточно высокие пределы прочности [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 20-72-10112).

1. Stuart S.J., Tutein A.B., Harrison J.A. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // J. Chem. Phys. 2000. V. 112. P. 6472-6486.

2. Baimova J.A., Polyakova P V., Shcherbinin S.A. Effect of the Structure Morphology on the Mechanical Properties of Crumpled Graphene Fiber // Fibers. 2021. V. 9. P. 85.

ТЕЧЕНИЕ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА В МИКРО- И НАНОКАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Пономарев Р.Р.^{1,3}, Алексеев М.С.^{2,3}, Ганченко Г.С.³, Демехин Е.А.^{3,4}

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

² Кубанский государственный университет, Краснодар

³ Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет, Краснодар

⁴ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: edemekhi@gmail.com

В работе научной группы Дж. Хана [1] экспериментально показано, что при течении электролита под действием внешнего электрического поля в микро-наноканалах переменного сечения возможно создание очень большой концентрации ионов в определенных местах канала. Эта работа привлекла большое внимание научного сообщества в силу возможного практического использования явления в медицине для раннего обнаружения болезни Альцгеймера и рака, создавая суперконцентрацию соответствующих клеток в пробах. Мани, Зангл и Сантьяго [2] создали упрощенную математическую модель течения и на ее основе провели исследование явления. В настоящей работе мы теоретически рассматриваем движение раствора электролита в наноканале на основе полной системы уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Навье-Стокса. В силу крайней малости чисел Рейнольдса явление рассматривается в стоковском приближении. Канал считался диэлектриком с заданной поверхностной плотностью электрического заряда. Поверхность канала была взята гидрофобной с некоторой длиной скольжения. Для численного разрешения системы использовался метод, аналогичный другим нашим исследованиям [3], модифицированный для решения настоящей задачи. На входе и выходе задавались следующие краевые условия: концентрация электронейтрального раствора, разность давлений и потенциалов. По мере движения жидкости в наноканале в силу заряженности его стенок электролит терял свою электронейтральность и приобретал объемный заряд. В свою очередь, на заряженную жидкость начинало действовать внешнее электрическое поле, создавая движущую кулонову силу в дополнение к градиенту давления. Это приводило к весьма сложному неоднородному поведению системы. В частности, при определенных значениях параметров задачи проводимость соли в некоторых сечениях канала резко уменьшалась, а толщина пристеночного заряженного слоя резко увеличивалась, приводя к образованию положительно заряженной перемычки канала. Толщина этой перемычки была порядка толщины Дебая и в размерном виде составляла 10 –

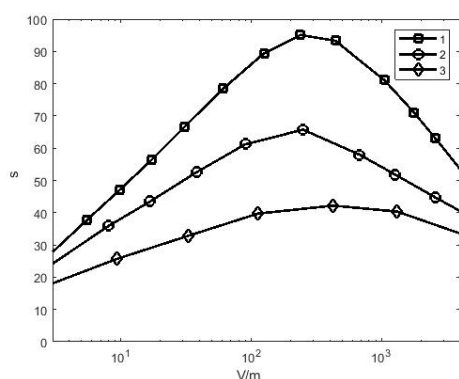


Рис.1. Безразмерная плотность заряда s , как функция средней напряженности E и длины скольжения b , 1- $b=1$ nm, 2 – 10 и 3 – 100.

100 нм, причем, при увеличении разности потенциалов на входе и выходе эта толщина уменьшалась, а заряд в ней увеличивался. Было также выяснено, что увеличение длины скольжения гидрофобной поверхности также приводит к усилению заряда в перемычке. При наличии отрицательно заряженных макромолекул такая положительно заряженная перемычка может служить ловушкой для них и быть физической причиной суперконцентрации. На рис.1 плотность заряда s , отнесенная к плотности в дебаевском слое, приводится в зависимости от средней напряженности поля E и длины скольжения b .

Работа была выполнена при поддержке РФФ № 22-29-00307.

1. Wang Y.-Ch., Stevens A. L. Han J. Million-fold preconcentration of proteins and peptides by nanofluidic filter // *Anal. Chem.* 2005. 77. P 4293-4299.

2. Mani A., Zangle T.A. and Santiago J. G. On the propagation of concentration polarization from microchannel-nanochannel interfaces // *Langmuir*. 2009. 25. P.3898-3908.

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ТВЕРДОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ С ИЗГИБНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Попов А.А., Болдин М.С., Чувильдеев В.Н., Щербак Г.В.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
e-mail: popov@nifti.unn.ru

В работе выполнено исследование связи твердости и трещиностойкости с изгибной прочностью керамик на основе оксида алюминия в условиях сложного напряженного состояния керамик. Керамики были получены методом электроимпульсного плазменного спекания при двух скоростях нагрева из порошка оксида алюминия (α - Al_2O_3) производитель Taimei Chemicals Co., Ltd (α - Al_2O_3 (rhombohedral) – 100 %) со средним размером частиц 200 нм. Прочность на изгиб в условиях сложного напряженного состояния круглых образцов керамик диаметром 12 мм и толщиной 1,1 мм исследовалась по методике ВЗВ [1].

Зависимость изгибной прочности от трещиностойкости и твердости приведена на рисунке 1 для керамик, полученных при двух скоростях разогрева (50 и 250 С/мин).

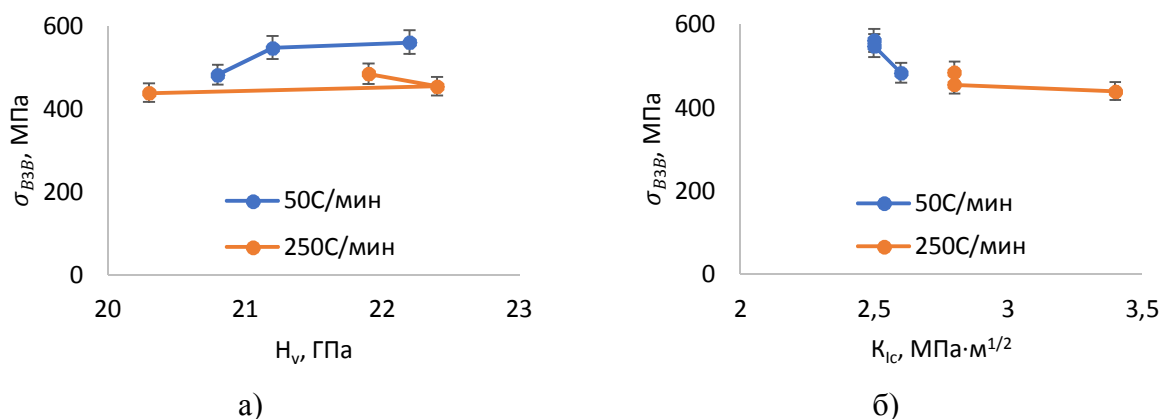


Рис. 1. Зависимость σ_{B3B} от K_{Ic} (а) и H_v (б).

Анализ рисунка 1 а показывает, что чем выше твердость керамики на основе оксида алюминия, тем выше изгибная прочность керамик. Действительно, твердость керамик – это способность материала сопротивляться внедрению алмазного индентора (в работе индентор Виккерса). При внедрении индентора в образец верхние слои материала вынуждены смещаться относительно более глубоких слоев материала. В методе ВЗВ – измерения изгибной прочности керамик в условиях сложного напряженного состояния, поверхностный слой материала (против нагружающего шарика) вынужден растягиваться больше, чем более глубокие слои. В таком случае изгибная прочность материала будет коррелировать с твердостью материала.

Зависимость изгибной прочности от трещиностойкости приведена на рисунке 1 б, откуда видно, что чем ниже трещиностойкость, тем выше прочность на изгиб. С точки зрения механики чем выше способность материала сопротивляться распространению трещины, тем при больших нагрузках должен разрушиться материал. Полученный результат для керамик показывает обратный тренд. Чем меньше трещиностойкость материала, тем выше прочность на изгиб. На наш взгляд это связано с критическим дефектом в объеме керамик, который раскрывается при ВЗВ тесте. Косвенно можно судить, что для керамик с меньшим значением трещиностойкости размер критического дефекта существенно ниже.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. (грант №20-73-10113).

1. Popov A A New method of the estimation of the bending strength of ultrafine-grained structural ceramics for application in the conditions of multiaxial stress-strain state / Popov A A, Berendeev N N, Boldin M S, Nokhrin A V and Chuvil'deev V N // Journal of Physics 1431. 2020. P. 10.

ФАКТОР ФОРМЫ В ЗАДАЧАХ О СЕГРЕГАЦИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Попов Е.С., Гончаров М.М., Буркова Е.Н., Юрина А.Д.

Физический Факультет ПГНИУ, Пермь

e-mail: yevgeniy.popov.0101@mail.ru

Работа посвящена численному исследованию фактора формы в задачах о сегрегации магнитной жидкости. Рассматриваемая геометрия представляет собой полость цилиндрической формы, заполненной в начальный момент времени однородной магнитной жидкостью (Рисунок 1а). В жидкости размещается исследуемый парамагнитный образец с сечением в форме правильного многоугольника. Помещенный во внешнее однородное магнитное поле материал образца намагничивается, что приводит к появлению градиентов модуля напряженности и, как следствие, концентрации магнитной жидкости. Возникающие неоднородности создают нескомпенсированное давление на поверхность магнитного материала, приводящее к появлению выталкивающей силы [1].

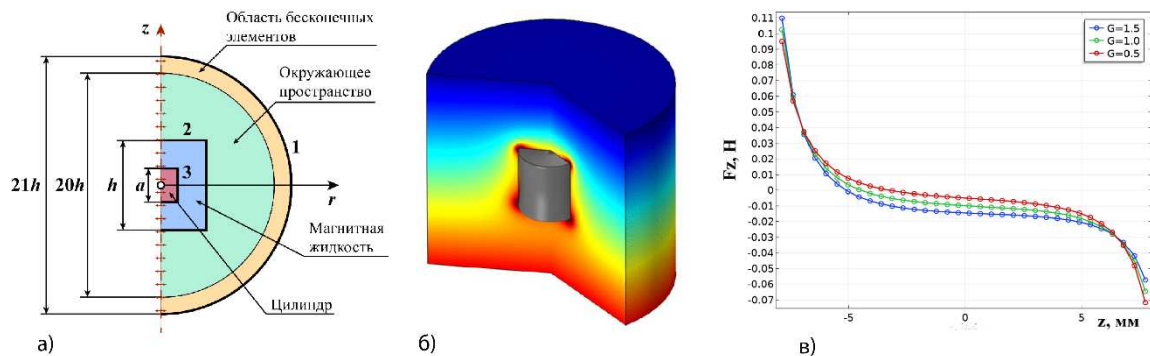


Рис. 1. а - схематическое представление области решения, б - магнитный цилиндр в магнитной жидкости, в - зависимость магнитной силы, действующей на магнит, от перемещения вдоль оси z .

Величина и направление этой силы, а также степень сегрегации магнитной жидкости, находятся в зависимости от интенсивности внешнего поля, формы и положения образца. Помимо анализа соответствующих зависимостей было определено положение нейтральной «плавучести» для различных форм погруженного объекта [2].

Результаты расчетов подкреплены экспериментальными исследованиями. Достигнуто хорошее совпадение предсказанных и наблюдаемых значений силы в различных вертикальных положениях алюминиевого цилиндра [3].

Результаты работы помогут лучше понять седиментационные процессы, протекающие в акселерометрах и уплотнителях, использующих в качестве рабочих сред магнитную жидкость.

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 357 с.

2. Kuznetsov A. A. Pshenichnikov A. F. Sedimentation equilibrium of magnetic nanoparticles with strong dipole-dipole interactions // Physical Review E. 2017. №. 95, С. 032609.

3. Пшеничников А. Ф. и др. Сила, действующая на немагнитное тело в магнитной жидкости // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. №. 3 (41).

ЭФФЕКТЫ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Положительный дроссельный эффект (эффект Джоуля-Томсона) заключается в снижении температуры газа при падении его давления. Данный эффект сопровождает течение газа в скважинах и трубопроводах при резком изменении проходного сечения, преодолении потоком различных препятствий и местных сопротивлений, в частности, при редуцировании давления природного газа на газораспределительных станциях. При этом газ попадает в такие термобарические условия, при которых происходит гидратообразование из-за имеющейся влаги в составе газа. В случае отсутствия подогрева перед дроссельным устройством сброс давления в нем приводит к выпадению конденсата в виде кристаллогидратов, образованию жидких пробок, обмерзанию регулирующих клапанов, запорной арматуры и приборов.

Компенсировать охлаждение газа при дросселировании можно за счет эффекта температурного разделения в сверхзвуковом потоке [1]. Эффект основан на снижении температуры пристенных слоев газа относительно температуры ядра потока при его разгоне до сверхзвуковых скоростей. При течении потока с дозвуковыми скоростями такого эффекта не наблюдается, и температура обтекаемой стенки практически равняется температуре торможения потока. Устройство температурного разделения представляет из себя конструкцию «труба в трубе», в котором осуществляется передача теплоты через перегородку к высокоскоростному (сверхзвуковому) потоку газа от низкоскоростного (дозвукового) потока.

Ранее было показано, что дроссель-эффект охлаждения газа при работе устройства на воздухе полностью перекрывается нагревом сверхзвукового потока от дозвукового [2]. В рамках данной работы проводится экспериментальное исследование прототипа устройства сверхзвукового безмашинного энергоразделения при работе на гидратообразующем компоненте природного газа – углекислом газе.



Рис. Схема экспериментального стенда с прототипом устройства температурного разделения.

Работа выполняется при поддержке гранта РНФ №19-19-00234.

1. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Макарова М.С. Использование метода сверхзвукового безмашинного энергоразделения при редуцировании давления природного газа // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 91. С. 2-15.

2. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А. Экспериментальное исследование сверхзвукового безмашинного энергоразделения в потоке углекислого газа с целью отработки технологии предотвращения гидратообразования // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». Т. 1. Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Москва, 2021. С. 83-92.

ТЕПЛООТДАЧА В ОБЛАСТЯХ ОТРЫВА И СЛЕДА СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ

Попович С.С.¹, Леонтьев А.И.^{1,2}, Виноградов Ю.А.¹

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

² МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

Целью проведения исследований по теплообмену на аэродинамических трубах является получение локального значения коэффициента теплоотдачи. В случае сверхзвукового потока он пропорционален отношению удельного теплового потока в стенку к характерной разности температур между локальной температурой поверхности (в каждый момент проведения эксперимента) и температурой пристенных слоев газа на теплоизолированной стенке – адиабатной температурой стенки [1]. Для определения адиабатной температуры стенки обычно используется коэффициент восстановления температуры r , который часто принимается постоянным (зависящим только от числа Прандтля газа Pr) в пределах ламинарного ($r=Pr^{1/2}$) или турбулентного ($r=Pr^{1/3}$) режимов течения. Таким образом, значение коэффициента восстановления температуры важно для обобщения результатов экспериментальных и численных исследований и перенесения полученных данных (в частности, по аэродинамическому нагреву) на натурные условия.

Чувствительность коэффициента теплоотдачи к изменению коэффициента восстановления температуры усиливается невысокими значениями температуры потока при проведении экспериментальных исследований на большинстве аэродинамических труб, поскольку разность между температурой стенки и адиабатной температурой в этом случае, как правило, мала [2]. Поэтому параметры теплообмена в сверхзвуковых аэродинамических трубах могут значительно изменяться, если небольшие неточности появляются при расчете коэффициента восстановления температуры.

Целью данной работы является исследование влияния чувствительности коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке на изменение адиабатной температуры при обтекании гладкой стенки и в областях отрыва и следа за уступом. Задача обусловлена необходимостью повышения точности экстраполяции экспериментальных данных по теплообмену на реальные условия эксплуатации на практике.

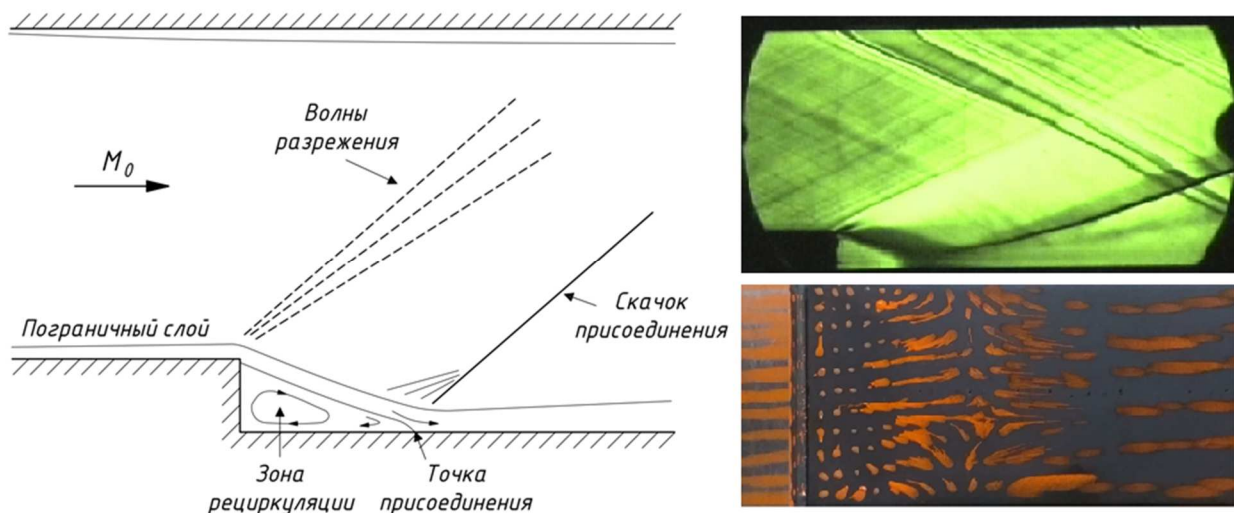


Рис. Схема течения сверхзвукового потока в отрыве и следе за уступом, теневая и масло-сажевая визуализация.

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

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат. 1985. 320 с.

2. Попович С.С. Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35-45.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАНОРАМНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ

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 (полевые) 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. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинам, с использованием регулярного разбиения на элементарные области.

Метод SSP основан на регистрации теневой фотографии объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей его среды. При этом за исследуемым объектом располагается лазерный источник света с равномерным пространственным распределением интенсивности. 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 (двумерной двухкомпонентной) и SSP-систем в исследовании задач термогазодинамики сверхзвуковых потоков. Исследования проводятся на сверхзвуковой аэродинамической установке AP-2 [2] для исследования газодинамики и теплообмена одно- и двухфазных потоков.

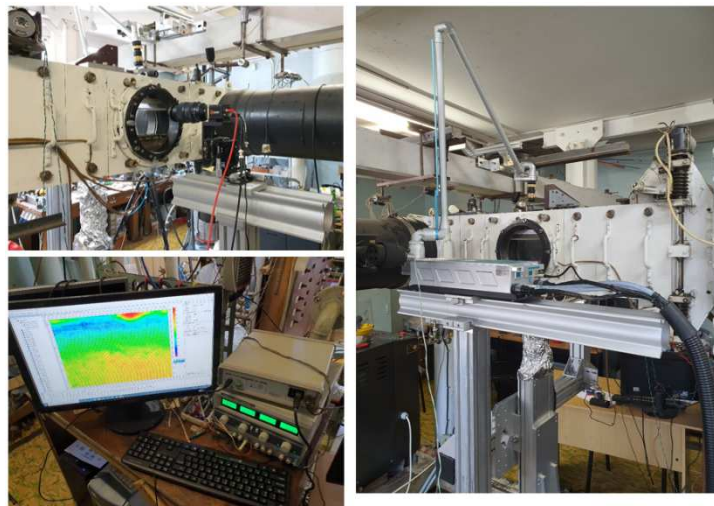


Рис. Оборудование сверхзвуковой аэродинамической установки системой панорамной диагностики потоков.

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

1. 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.

2. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А., Загайнов И.А. Отработка методики панорамной диагностики потоков на базе PIV при исследовании задач сверхзвуковой газодинамики // Ломоносовские чтения. Научная конференция. Секция механики. 2022. Тезисы докладов. Изд-во Института механики МГУ (Москва). С. 176.

РАЗДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ МАКРОМОЛЕКУЛ В РАСТВОРЕ ЭЛЕКТРОЛИТА В НАНОКАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Попов В.А.^{1,3}, Алексеев М.С.^{2,3}, Ганченко Г.С.³, Демехин Е.А.^{3,4}

⁴ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

³ Кубанский государственный университет, г. Краснодар

¹ Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,

Финансовый университет, г. Краснодар

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

e-mail: edemekhi@gmail.com

Гриффитс и Нильсон [1] экспериментально показали, что длинные наноканалы (с характерной шириной 10–100 нм) можно использовать для разделения крупных заряженных микрочастиц на основе их заряда, подвижности и других свойств. В настоящей работе теоретически рассмотрено движение двух типов заряженных макромолекул (протеинов, ДНК и других биочастиц) в буферном растворе NaCl в длинном наноканале. Для описания этого движения бралась система нелинейных сильно сцепленных уравнений Пуассона, Навье-Стокса в приближении ползущего течения и уравнений транспорта для ионов каждого типа. Эта система уравнений разрешалась численно, метод решения адаптирован из [2]. Свойства типичных макромолекул брались из монографии [3]. Краевые условия брались из нижеописанных физических ограничений. Втекание и вытекание раствора электролита происходит из макроразмерных резервуаров, заполненных электронейтральным раствором электролита, образованного четырьмя типами ионов (Na^+ , Cl^- и двух типов отрицательно заряженных макромолекул), равномерно распределённых в объеме резервуара. На входе и выходе наноканала в резервуары поддерживались постоянные разность давлений и электрических потенциалов. Стенки наноканала рассматривались отрицательно заряженными, а между дебаевскими слоями предполагалась возможность их перехлеста (overlap). Поверхностный заряд приводил к нарушению электронейтральности раствора, причем, ионы различных типов реагировали по-разному. Движущими ионы силами являются одновременно градиенты электрического потенциала, давления и концентрации, приводящие к сложному транспорту ионов вдоль наноканала из входного резервуара в сторону выходного. Отношение длины наноканала к его ширине было фиксировано и равно 100. Зарядные числа макромолекул предполагались -100 и -200, коэффициенты их диффузии рассчитывались по формуле Эйнштейна. Молярная концентрация буферного раствора соли бралась 10^3 моль/м³, концентрация обеих типов макромолекул предполагалась равной. Были проведены массовые

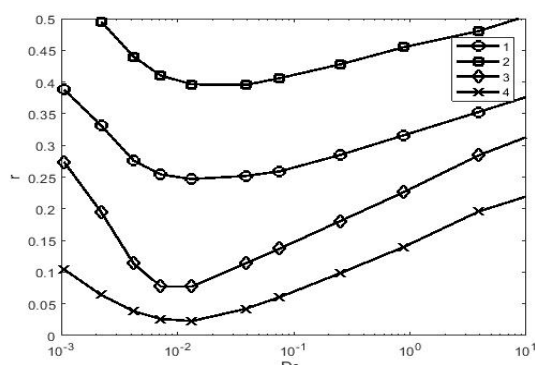


Рис.1. Зависимость отношения скоростей «пробок» макромолекул от числа Дебая De. 1- концентрация макромолекул 10^{-4} mol/m³, 2 – $3 \cdot 10^{-4}$, 3 – $7 \cdot 10^{-4}$, 4 – 10^{-3} .

расчеты при различных значениях остальных параметров. При некоторых значениях параметров, по мере движения двух типов макромолекул, они локализовались в двух «пробках», движущихся с разными скоростями. Наиболее сильно отношение скоростей оказалось зависящим от числа Дебая. На рисунке 1 приведены зависимости отношения скоростей «пробок» от числа Дебая, показывающее существование оптимума с точки зрения разделения макромолекул. Мы объясняем наличие экстремума достижением ситуации, когда один тип макромолекул перемещается в слое Дебая, а другой – в основном течении.

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

1. Griffiths S.K., Nilson R.H. Charged species transport, separation and dispersion in nanoscale channels.// Anal. Chem. 2006. 78. P 8134-8141.
2. 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.
3. Ninham B.W. and Nostro P. Lo. Molecular forces and self-assembly. Cambridge University Press. 2010. 365 P.

О РАЗВИТИИ ПЕСЧАНОГО ПОЙМЕННОГО БЕРЕГА РЕКИ

Потапов Д.И.¹, Потапов И.И.²

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск

² Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск

e-mail: shineon91@mail.ru, potapov2i@gmail.com

Сформулирована математическая модель эрозии берегового склона песчаного канала, происходящей под действием проходящей паводковой волны. Модель включает в себя уравнение движения квазиустановившегося гидродинамического потока в створе канала. Движение донной и береговой поверхности русла определяется из решения уравнения Экснера, которое замыкается оригинальной аналитической моделью движения влекомых наносов. Модель учитывает транзитные, гравитационные и напорные механизмы движения донного материала, и не содержит в себе феноменологических параметров. Движение свободной поверхности гидродинамического потока определяется из решения дифференциальных уравнений баланса. Модель учитывает изменения средней по створу турбулентной вязкости при изменении створа канала.

На основе метода конечных элементов получен дискретный аналог сформулированной задачи и предложен алгоритм ее решения. Особенностью алгоритма является контроль влияния движения свободной поверхности потока и расхода потока на процесс определения турбулентной вязкости потока в процессе эрозии берегового склона. Проведены численные расчеты, демонстрирующие качественное и количественное влияние данных особенностей на процесс определения турбулентной вязкости потока и эрозию берегового склона русла [1].

Сравнение данных по береговым деформациям, полученных в результате численных расчетов, с известными лотковыми экспериментальными данными показали их согласование.

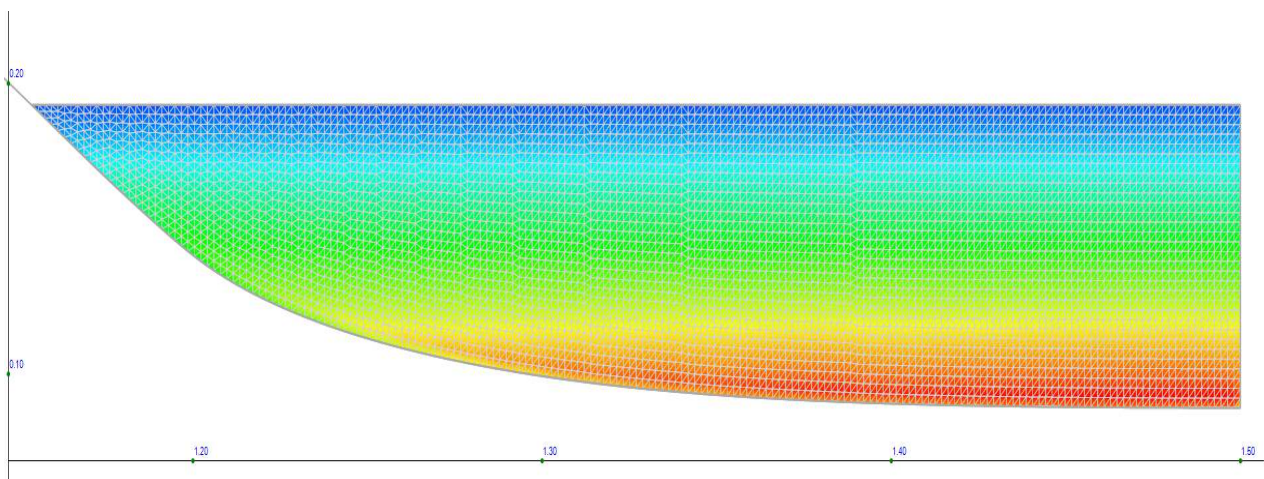


Рис. Касательное напряжение в створе деформируемого канала.

1. Потапов Д.И., Потапов И.И. Развитие берегового откоса в русле трапециевидного канала // Компьютерные исследования и моделирование, 2022, Т.14, №3.

О РЕВИЗИИ РУСЛОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДНА, ИМЕЮЩЕГО КРИТИЧЕСКИЕ УКЛОНЫ

Потапов И.И.¹, Петров А.Г.², Бритов А.Д.³, Епихин А.С.³, Чжан Ц.⁴

¹Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

³Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

⁴Океанологический университет Китая, Китай

e-mail: potapov2i@gmail.com, britovad@ispras.ru

Трубопроводы широко используются для транспорта нефти и газа, поэтому вопросам их безопасности и устойчивости уделяют больше внимание. Необходимо проводить исследования физических процессов, возникающих при их обтекании, т.к. трубопроводы, уложенные на морском дне, подвергаются эрозии грунта в нижней части [1]. В работе предложена модифицированная формула расхода влекомых наносов для дна, имеющего высокие уклоны. Для определения гидродинамических характеристик использовался программный комплекс OpenFOAM. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными [2]. Ниже показан размыв гидродинамическим потоком несвязного дна под трубопроводом.

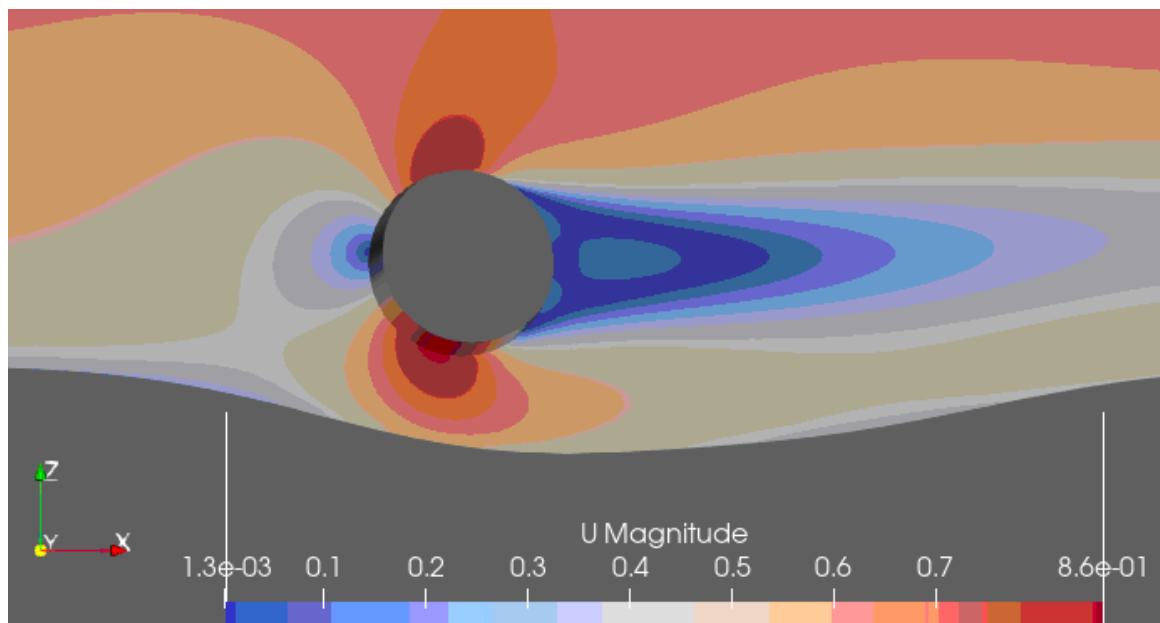


Рис. Размыв дна под цилиндром.

Также показаны причины по которым традиционный подход учета уклонов дна при расчете критических касательных напряжений, применяющихся при расчетах донных деформации, дает заниженные значения размыва донной поверхности под цилиндром.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-57-53019.

1. Petrov A.G., Potapov I.I. Selected Sections of Channel Dynamics. - Moscow.: Lenand, (2019). 244 p.
2. Zhao, M., & Cheng, L. (2008). Numerical modeling of local scour below a piggyback pipeline in currents. Journal of Hydraulic Engineering, 134(10), 1452-1463. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:10\(1452\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1452)).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ СТОУНЛИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОДЫ И ПЕСКА, НАСЫЩЕННОГО ВОДОЙ ИЛИ ГАЗОГИДРАТОМ

Рафикова Г.Р., Каримова Г.Р.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

e-mail: rafikova_guzal@mail.ru

Одними из самых перспективных источников энергии с большим содержанием углеводородов являются природные газогидраты, большая часть которых сосредоточена в пришельфовой зоне, в донных отложениях водоемов мирового океана. Природные газогидраты играют одну из ведущих ролей при формировании атмосферы и гидросферы Земли, и постепенные климатические изменения могут привести к нарушению термобарических условий существования гидрата, что приведет к его распаду и к выбросу большого количества газа в атмосферу. В связи с вышеприведенными причинами необходимым является своевременное выявление таких залежей и наблюдение за ними.

В настоящей работе исследован процесс распространения волн Стоунли [1-5] на границе раздела воды и песка, насыщенного водой или газогидратом. Исходя из анализа акустических свойств волны Стоунли (величин скоростей и глубин проникновения продольных, поперечных волн) можно определить плотность содержания газогидратов в пластах и масштабы таких пластов. Принято, что волна Стоунли движется в направлении положительной оси x , вдоль границы $z=0$ раздела двух сред (Рис. 1). Получены значения скорости распространения волн Стоунли, определена зависимость глубины проникновения звуковой волны, продольных и поперечных волн в жидкость и в твердую среду от частоты. Предложена методика определения толщины гидратосодержащего слоя по вырождению волны Стоунли с увеличением ее длительности.

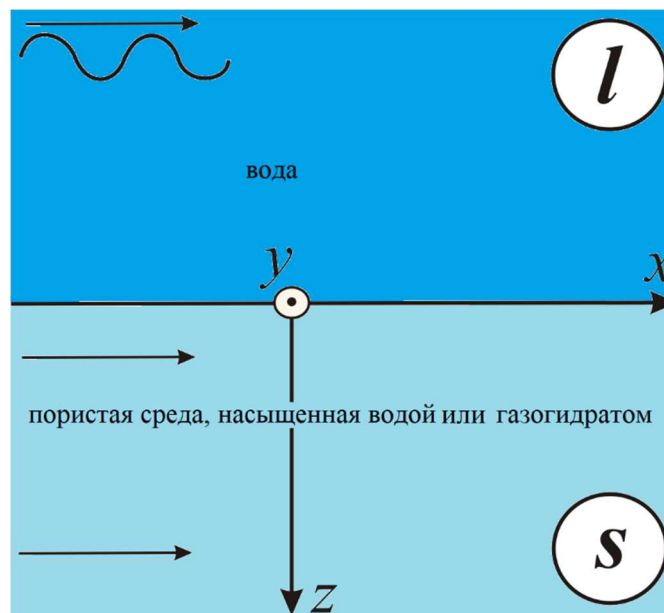


Рис. 1. Схема распространения волны на границе раздела двух сред.

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

1. Stoneley R. Elastic Waves at the Surface of Separation of Two Solids, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol. 106, No. 738 (Oct. 1, 1924), pp. 416-428.

2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1973. 343 с.

3. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. Москва: Наука, 1981. 287 с.

4. Волькенштейн М.М., Левин В.М. «Структура волны Стоунли на границе вязкой жидкости и твердого тела» // Акуст. Журн. 1988. Т. 34, № 4. С. 608-615.

5. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю. Волны в пористой среде со слоем, содержащим газовый гидрат // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. №4.

ЧЕРНОВСКИЕ АППРОКСИМАЦИИ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Ремизов И.Д.

Международная лаборатория динамических систем и приложений НИУ ВШЭ, Нижний Новгород
e-mail: ivremizov@yandex.ru



В докладе будут представлены полученные автором доклада результаты, занимающие промежуточное положение между квантовой механикой, теорией дифференциальных уравнений и вычислительной математикой. Все эти результаты посвящены линейному уравнению Шрёдингера. Рассмотрено два случая: многомерное уравнение Шрёдингера с гамильтонианом вида «минус лапласиан плюс потенциал», и одномерное уравнение Шрёдингера с гамильтонианом, содержащим производные сколь угодно высокого порядка, умноженные на переменные коэффициенты. Причём второй случай, если считать коэффициенты постоянными, может рассматриваться как запись уравнения Шрёдингера в импульсном представлении. Доказаны формулы, выражающие решение задачи Коши для уравнения Шрёдингера через начальное условие и коэффициенты уравнения. Решение представляется в виде предела сходящихся к нему черновских аппроксимаций, называемых так потому, что ключевую роль в их построении играет теорема Чернова об аппроксимации операторных полугрупп. Эту теорему можно считать далеко идущим бесконечномерным обобщением теоремы о «втором замечательном пределе» из элементарного курса математического анализа. Полученные аппроксимации могут быть использованы в теоретических построениях, а также для численного нахождения решения задачи Коши. Предлагаемый метод имеет весьма большую общность, однако даёт достаточно громоздкие формулы для решения.

Центральное положение в этих методах занимает теория операторных полугрупп. Операторная полугруппа – это прямое обобщение понятия экспоненты на бесконечномерные пространства. Так как по правилам конференции необходимо сопроводить тезисы доклада рисунком, а чертежей или графиков в работе не возникало, то в качестве рисунка прилагается эмблема конференции по операторным полугруппам One-Parameter Semigroups of Operators (OPSO), организованная по инициативе автора доклада в 2021 и 2022 годах, ссылки на сайты конференции следующие: <https://nnov.hse.ru/bipm/dsa/opso2021> <https://nnov.hse.ru/bipm/dsa/opso2022>. Все желающие приглашаются к участию в этой конференции в 2023 году. При наличии желания у слушателей автор может поделиться опытом организации международной конференции онлайн от идеи до реализации.

1. Remizov I.D. Formulas that represent Cauchy problem solution for momentum and position Schrödinger equation// Potential Analysis, 2020, 52, 339–370.

2. Ремизов И.Д. Фейнмановские и квазифейнмановские формулы для эволюционных уравнений// Доклады Академии наук (математика), 2017, 476, № 1, 17–21.

3. Remizov I.D. Quasi-Feynman formulas – a method of obtaining the evolution operator for the Schrödinger equation// Journal of Functional Analysis, 2016, 270:12, 4540-4557, arXiv: 1409.8345.

МЕХАНИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ФЛОТАЦИИ КВАРЦА

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

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

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

e-mail: k.rybkin@gmail.com

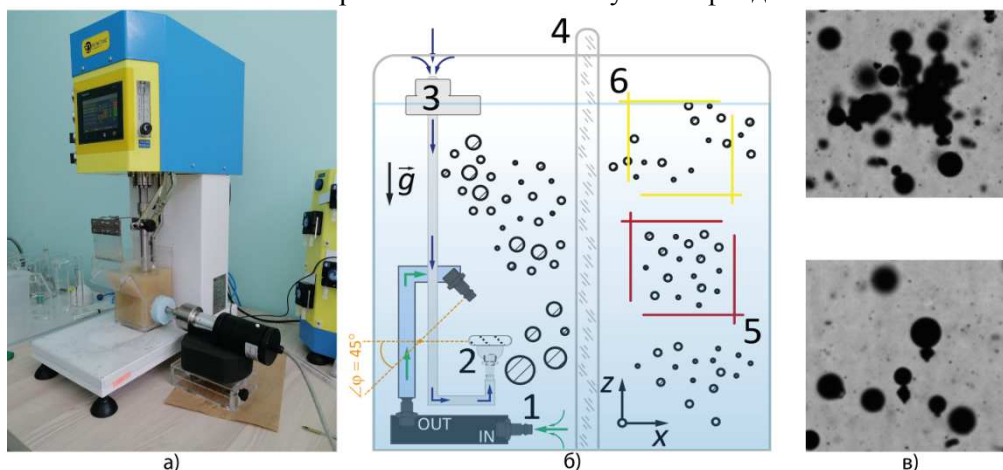
Ультразвуковое (УЗ) воздействие может быть использовано на различных этапах рудоподготовки, что оказывает значительное влияние на эффективность процесса флотации [1]. Физические механизмы УЗ воздействия на флотационную пульпу очень разнообразны например: появление в жидкости и на поверхности твердых тел парогазовых микропузырьков, возникающих вследствие кавитации [2]; образование, под действием силы Бьеркинса, устойчивых агломератов из воздушных пузырьков; очистка поверхности минералов от шламовых частиц и т.д. Цель настоящей работы состоит в рассмотрении процессов возникающих под действием УЗ во флотационной пульпе с точки зрения физико-химической механики.

Для регистрации пузырьков и частиц в экспериментах использовалась изготовленная из акрилового стекла толщиной 3 мм ювета, представляющая из себя параллелепипед с внутренними размерами камеры 235×240×35 мм³. Генерация пузырьков осуществлялась модифицированным мембранным методом при помощи погружного водяного насоса (1), мелкодисперсной кварцевой мембраны (2), воздушного компрессора (3), оргстеклянного ограничителя с прорезью (4). Для регистрации объектов в области (5, 6) использовалась камера Basler acA1920-155um и коллимированный источник контрольного света.

Опыты по флотации кварцевого песка проводились на лабораторной флотационной машине ФМП-Л (ВЭКТИС минералз) с использованием водного раствора флотационного реагента dodecylamine hydrochloride (ДАН) различных концентрации и источника УЗ Bandelin HD 4200.

Эксперименты показали, что при интенсивном УЗ воздействии наблюдается образование пузырьковых кластеров, состоящих из пузырьков равного диаметра. Низкая концентрация реагента во флотационной пульпе способствует закреплению отдельных частиц кварцевого песка на флотационном пузырьке, образование агломератов, в этом случае не происходит, а отдельные пузырьки, с закрепленными частицами, не способны подняться к поверхности жидкости. Увеличение концентрации ДАН способствует как эффективному закреплению твердой частицы на пузырьке, так и образованию агломератов, состоящих из твердых частиц и пузырьков. В этом случае увеличивается как вероятность закрепления и удержания частиц на пузырьке, так и вероятность их совместного всплытия, поэтому процесс флотации становится значительно более эффективным.

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



а) Фотография флотационной машины с источником УЗ; б) схема установки для генерации пузырьков и регистрации объектов исследования; в) фото агломератов и единичных пузырьков с частицами кварца.

1. Chen Y. et al. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation //Ultrasonics sonochemistry. – 2020. – Т. 60. – С. 104739.

2. Lyubimova, T., Rybkin, K., Fattalov, O., Kuchinskiy, M., Filippov, L. Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound //Ultrasonics. – 2021. – Т. 117. – С. 106516.

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТОВОЛОКОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сафарян К.А., Голдобин А.А., Трефилов И.А., Мельников Р.М.

Физический факультет ПГНИУ, Пермь

e-mail: safaryank@icloud.com

В работе исследуются перспективы создания оптического датчика вибрации с использованием оптоволоконных технологий. Разрабатываемое устройство рассчитано на диапазон измеряемых частот от 10 до 10^3 Гц и амплитуд от 1g до 10g. В качестве основы для датчика предлагается использовать интерферометр Маха-Цендера [1, 2]. Задержка по фазе в таком датчике может быть обеспечена оптическим кристаллом, размещенным в одном из оптических каналов системы. Первоочередной задачей ставился подбор оптимальной конфигурации и свойств оптического кристалла, которые смогли бы обеспечить стабильную и эффективную работу датчика [3]. Для этого проводилось численное моделирование прохождения оптического сигнала через кристаллы с разными формами неоднородности (Рисунок 1 а).

В результате математического моделирования оптических процессов продемонстрирована возможность использования оптоволоконного интерферометра с оптическим кристаллом для измерения частоты и интенсивности вибраций. Показано, что перемещение кристалла способно изменить интегральную интенсивность проходящего света, которую можно интерпретировать в терминах перемещений и ускорений. Проведены оценки чувствительности датчика и проведены численные расчеты полей интенсивности и фазы. В результате перебора пяти конфигураций выбрана оптимальная.

В ходе выполнения работы был выявлен ряд недостатков, связанных с трудностью изготовления оптических кристаллов. В ходе изготовления опытных образцов возникли технологические трудности, приводящие к широкому разбросу характеристик изделия и низкой повторяемостью результатов. Поэтому для дальнейших разработок решено упростить оптическую систему, используя зеркало, закрепленное в корпусе датчика на пути оптического сигнала и меняющее получаемое на выходе значение интенсивности света (Рисунок 1 б).

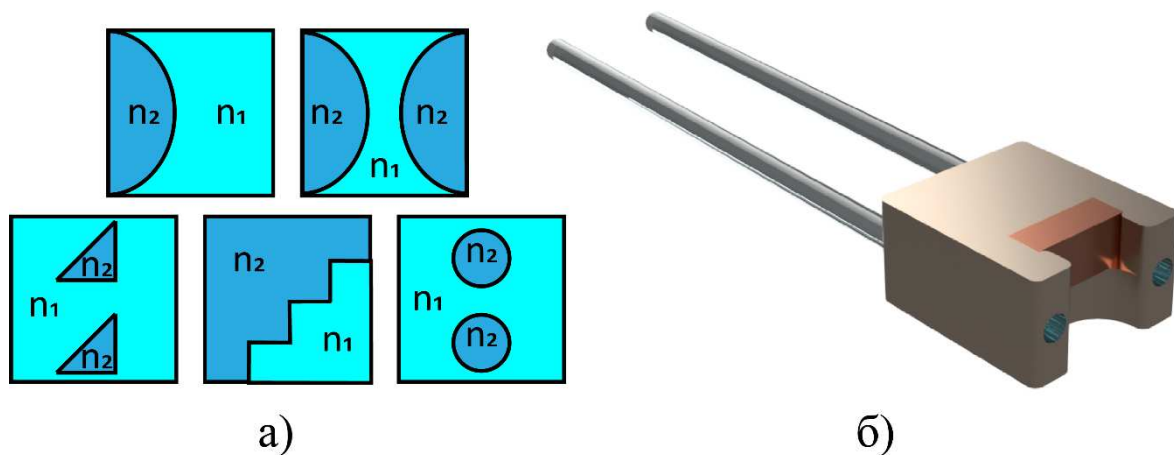


Рис. 1. а) Конфигурации оптического кристалла б) Оптический датчик вибраций с зеркалом.

По результатам численного исследования собран рабочий прототип такого датчика вибраций, который прошел валидацию на экспериментальном вибрационном стенде. Получено хорошее совпадение экспериментальных и предсказанных значений амплитуды и частоты вибраций.

1. Rajan G. et al. Analysis of vibration measurements in a composite material using an embedded PM-PCF polarimetric sensor and an FBG sensor //IEEE sensors journal. – 2011. – Т. 12. – №. 5. – С. 1365-1371.

2. Sun Q. et al. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer // Optics Communications. – 2008. – Т. 281. – №. 6. – С. 1538-1544.

3. Wu S. et al. Flexible optical fiber Fabry–Perot interferometer based acoustic and mechanical vibration sensor //Journal of Lightwave Technology. – 2018. – Т. 36. – №. 11. – С. 2216-2221.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ГРАФЕН-МЕТАЛЛ

Сафина Л.Р.¹, Баимова Ю.А.^{1,2}

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

²Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: safli@mail.ru

На сегодняшний день активно ведутся исследования взаимодействия графена с наночастицами различных металлов, таких как медь, алюминий, никель, титан и т.д. Структуры графен-металл особенно интересны тем, что могут отображать не только отдельные свойства графена, но приобрести качественно новые. В данной работе методом молекулярной динамики исследуется деформационное поведение композитов на основе графена и наночастиц металла: Ni и Cu.

Для того, чтобы получить композит, структуры графен-металл подвергаются выдержке при комнатной температуре с последующим гидростатическим сжатием при 1000 К [1]. На рис. 1 показаны структуры графен-металл с разными наночастицами металлов в процессе гидростатического сжатия. Как видно, наночастицы Ni и Cu по-разному взаимодействуют с графеном. Так как энергия связи центра *d*-зоны ниже уровня Ферми для Ni(111) составляет -1,29 эВ, а для Cu(111) это значение в два раза меньше и она равна -2,67 эВ. Вследствие этого, графен и Ni сильно взаимодействуют между собой: происходит покрытие наночастиц никеля листом графена. Для наночастиц меди с гораздо меньшей энергией связи наблюдается обратная ситуация: графен и наночастицы Cu колеблются под влиянием температуры, но не взаимодействуют. Однако, при сжатии оба композита образуют однородные структуры. Для оценки прочности, полученные структуры подвергают одноосному растяжению.

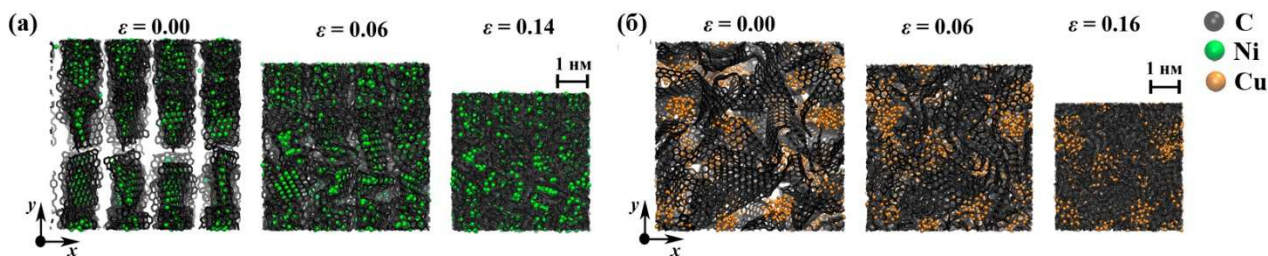


Рис. 1. Структура композита (а) графен-Ni и (б) графен-Cu в процессе гидростатического сжатия.

Результаты моделирования показывают, что композит на основе графена и наночастиц Cu демонстрирует лучшие механические свойства, чем композит с наночастицами Ni. Наибольшее значение модуля Юнга получено для композита графен-Cu ($E = 284$ ГПа), так как в этой структуре за счет плавления наночастиц Cu в процессе гидростатического сжатия при температуре 1000 К, формирование новых химических связей между отдельными элементами композита происходит легче. Температура плавления наночастиц Ni несколько выше, поэтому количество новых ковалентных связей меньше, следовательно, модуль Юнга ($E = 235$ ГПа) и прочность композита будут ниже. Однако важно отметить, что оба композита выдерживают большие степени деформации при одноосном растяжении. Полученные результаты способствуют лучшему пониманию процессов получения, деформационного поведения и механических свойств композитов на основе графена и наночастиц металла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 20-72-10112).

1. Safina L.R., et all. Ni-Graphene composite obtained by pressure-temperature treatment: atomistic simulations. // Phys. Status Solidi RRL. 2021. P. 2100429.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ВНУТРЕННЕГО НЕОДНОРОДНО НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА НА КОНВЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАЗОРЕ

Селетков Б.С., Макарихин И.Ю., Гончаров М.М., Голдобин А.А.
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
e-mail: seletkov.b@gmail.com

В проведенном исследовании экспериментально изучены ориентационные эффекты в ячейке Хеле-шоу, полость которой образована частично нагретыми коаксиальными цилиндрами (Рисунок 1 а). В качестве рабочей жидкости выступала вода. Внешний и внутренний цилиндры были изготовлены из меди и пластика соответственно. Одна из половин внутреннего цилиндра представляла собой нагреватель, созданный путем заполнения полости нихромовой нитью и термопастой и герметизацией слоем меди. Для обеспечения фиксированного перепада температур ячейка помещалась в резервуар с жидкостью. Температура нагревателя поддерживалась с помощью ПИД регулятора.

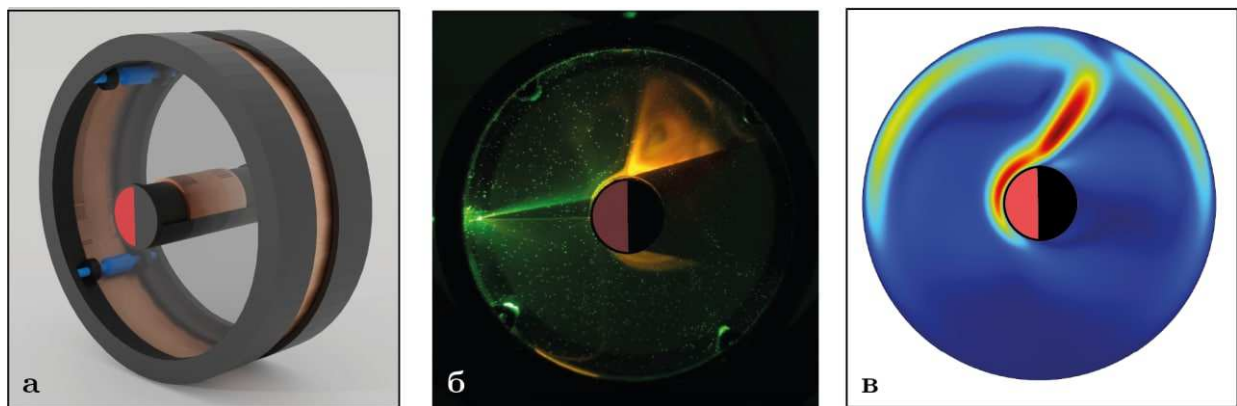


Рис. 1. а) Вид ячейки хеле-шоу. Качественное совпадение картин линий тока при угле наклона $\alpha = 90^\circ$, числе Релея $Ra=2 \cdot 10^6$, полученных в эксперименте(б) и расчете(в).

В работе получены скоростные поля с помощью флуоресцирующего красителя, в качестве которого использовался родамин. Зарегистрированные конвективные структуры качественно совпадают с результатами расчётов (Рисунок 1 б, в), опубликованных в статье [1]. Слабый изгиб конвективного факела в эксперименте связан с действием сил трения на фронтальной и тыльной стенке, которые не учитывались в расчётах.

Были получены зависимости угла наклона факела от угла ориентации нагревателя при различной толщине ячейки.

1. Matvey Maksimovich Goncharov. et al. Gravity Orientation Effects on Convection in the Gap Between Partially Heated Cylinders //Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2022. – С. 1-9.

ТЕНЗОР ЧЕТВЕРТОГО РАНГА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Семенова Е.В.¹, Шарафутдинова К.Р.¹, Саченков О.А.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань
e-mail: elena.semionova2011@gmail.com

Механические свойства в многофазных или поврежденных материалах тесно связаны с микроструктурой. Степень ориентации микроструктуры в материале является фундаментальной величиной, представляющей большой интерес при изучении механических свойств объектов как природного, так и искусственного происхождения. Для характеристики степени ориентации материалов Салтыковым [1] были использованы методы стереологии для получения характеристик объема по плоским сечениям. Позже эта теория была развита, и было показано, что подобное распределение может быть описано эллипсоидом, квадратичная форма которого составляет тензор второго ранга – тензор анизотропии [2, 3]. В работе рассмотрены методы описания структурных свойств материалов тензорами более высокого порядка.

Для описания неоднородной среды был использован МПЛ-метод, обобщенный на трехмерный случай. Это распределение представляет собой функциональную зависимость, интегрируемую с квадратом, которая может быть разложена в ряд Фурье. Были рассмотрены три члена разложения. Первое слагаемое – суть скаляр, в нашем случае описывающая пористость всего образца. Второе слагаемое – тензор второго ранга, который характеризует оси ортотропии или степень вытянутости осредненной поры. Третье слагаемое – тензор четвертого ранга, он и представляет особый интерес, так как потенциально может связать характеристику распределения с тензором модулей упругости.

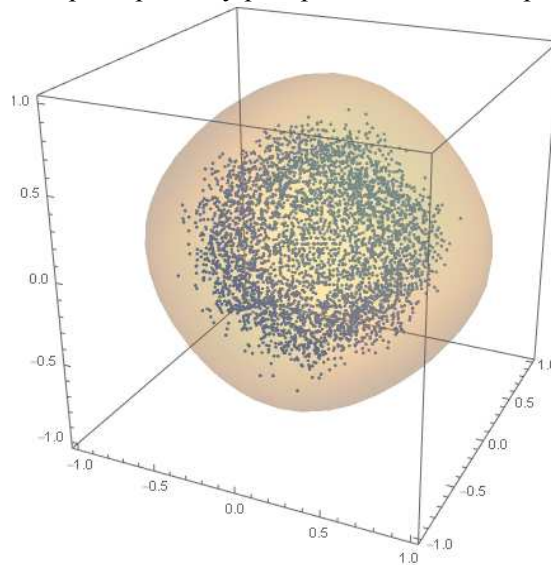


Рис. Аппроксимация МПЛ-распределения поверхностью 4 порядка.

Для тензора четвертого ранга была рассмотрена тензорная поверхность, которая является поверхностью 4 порядка. Поэлементное сравнение тензорных поверхностей тензора четвертого ранга и тензора упругих констант показало, что однозначно можно связать лишь 9 из 21 компонент соответствующих тензоров. Остальные же компоненты являются линейными комбинациями.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 20-01-00535.

1. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - М.: Металлургия, С. 1976. – 270.
2. Киченко А.А, Тверье В.М, Няшин Ю.И. Экспериментальное определение тензора структуры трабекулярной костной ткани //Российский журнал биомеханики. 2011. Т. 15, № 4. С. 78-93.
3. Няшина Ю.И., Подгайца Р.М. Экспериментальные методы в биомеханике: учебное пособие // под редакцией. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, С. 2008. – 400.

МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Селиверстов Г.В., Серегина А.А.
Тульский Государственный Университет, Тула
e-mail: Seregina.ann-1998@mail.ru

В распоряжении современного конструктора имеется большое количество САПР, которые могут решать различные инженерные задачи. Рассматривая наиболее распространенные из них (Компас, АПМ) можно отметить, что все они имеют модули для построения конечно-элементных моделей и анализа их на статическую и циклическую прочность. Оценка прочности производится по методу допускаемых напряжений и позволяет конструктору дать предварительное заключение по живучести проектируемого элемента. При всем удобстве такого подхода к расчету конструкции существует ряд ограничений по применению конечно-элементного моделирования без экспериментальной проверки действующих напряжений в ответственных элементах. К таким элементам, например, можно отнести несущие металлоконструкции грузоподъемных машин, неправильный расчет которых может привести к техногенным катастрофам. Для того чтобы оценить действующие напряжения, возникающие в металлоконструкции машины, обычно применяют тензометрирование. Суть данного метода заключается в размещении тензодатчиков в исследуемой области, их калибровки, анализ результатов, снятие тензодатчиков и восстановление ЛКП. Данный метод дает достаточно точные данные по напряжениям в элементе, но отличается большой трудоемкостью.

Нами предлагается технология оценки напряженного состояния в металлоконструкции по изменению температурных полей исследуемой области[1]. Если обратиться к механике деформированного твердого тела, то энергетически процесс деформирования включает в себя затраты на деформацию и диссипацию. Рассеянное тепло в виде диссипации можно регистрировать с помощью тепловизионного оборудования с достаточно большой точностью. Проведенное экспериментальное исследование при статическом нагружении лабораторных образцов из малоуглеродистой стали (Ст3сп5) и низколегированной (09Г2С) показали, что существуют определенные зависимости, которые позволяют оценить действующие напряжения по изменению температурного поля деформированной области[2]. Теплограмма образца из стали Ст3сп5 в момент разрушения показана на рисунке.



Рис. Теплограмма образца из стали Ст3сп5 в момент разрушения.

При ступенчатом нагружении были зафиксированы изменения температуры в зонах максимального деформирования. Была проведена аппроксимация известными функциями, проверка которых по критерию Фишера подтвердила их адекватность.

Таким образом, оценка действующих напряжений тепловизионным методом позволяет существенно уменьшить время, затрачиваемое на контроль и увеличить объективность оценки за счет снижения человеческого фактора.

1. Г.В. Селиверстов, А.А. Серегина Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкции грузоподъемной машины//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 602-605.

2. Г. В. Селиверстов, А.А. Серегина Исследование температурных полей при деформации образцов с концентратором напряжений// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 10. – С. 459-462.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АРИТМОГЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТКАНИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ

Сёмин Ф.А., Галушка В.А., Цатурян А.К.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: f.syomin@imec.msu.ru

Данные клинических наблюдений и эксперименты на культурах клеток сердечной мышцы демонстрируют возникновение спиральных волн, имеющих тенденцию к закручиванию вокруг областей миокарда со сниженной проводящей и сократительной способностью. Причиной образования таких волн может служить внепериодическая электрическая стимуляция или повышение частоты стимуляции при одновременном снижении возбудимости миокарда.

Для изучения этих эффектов применили модель электромеханики миокарда [1], которая детально описывает механику сокращения миокарда и включает упрощённое описание распространения в ней электрического возбуждения и электромеханического сопряжения. Несмотря на простоту электрофизиологического блока модели, не содержащего уравнений для концентрации ионов натрия и калия, модель воспроизводит важные зависимости развиваемой мышцей силы и динамики внутриклеточной концентрации кальция от частоты стимуляции. Важной особенностью модели являлся учёт в ней зависимости скорости проведения возбуждения в ткани от её деформаций. Опытные данные свидетельствуют о том, что в основе такой механо-электрической обратной связи лежит изменение ёмкости клеточных мембран при растяжении клеток.

При постановке задачи рассматривали тонкослойный квадратный образец миокарда, предварительно растянутый на 15 % вдоль направления мышечных волокон, ориентированных вдоль оси абсцисс. Левую и правую границы удерживали упругими связями. Верхняя и нижняя стороны образца, а также его верхняя и нижняя поверхности были свободны от нагрузок. Проводили два типа численных экспериментов: запуск волны вдоль узкой невозбудимой и непроводящей области, имитирующей поражённый участок миокарда, и запуск спиральных волн с помощью повторного стимула, подаваемого сразу после прохождения первой волны, с последующим закручиванием волн вокруг невозбудимой области, расположенной в центре образца.

Расчёты демонстрируют отрыв волн от «поражённых» областей при высокой частоте стимуляции (или частоте вращения спиральных волн) и сниженной возбудимости ткани. При некоторых условиях отрыв волн прекращался при «отключении» в модели механо-электрической обратной связи. Проведённые исследования показывают, что наша новая модель электромеханики миокарда описывает важные аритмогенные эффекты, наблюдаемые в клинической практике, и свидетельствуют о важности учёта в модели обратной связи для корректного описания распространения волн электрического возбуждения в миокарде в норме и при патологиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-74-00046.

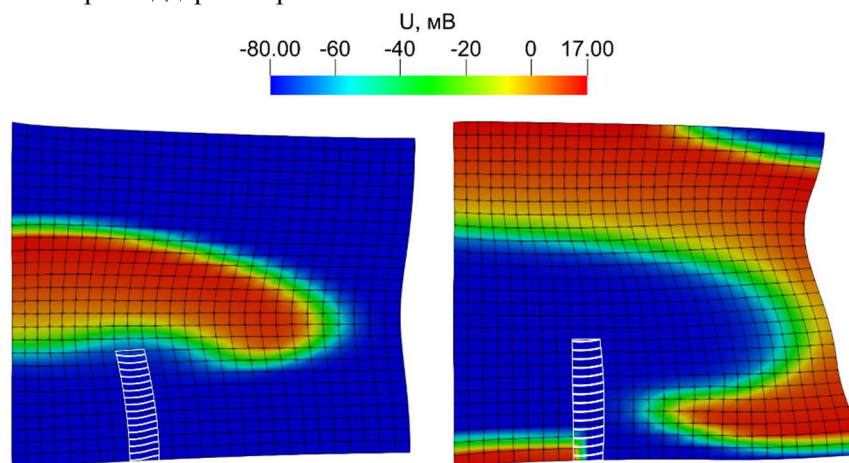


Рис. Отрыв волны электрической активации от невозбудимой области (заштрихована белым) и её дальнейшее закручивание. Приведены значения трансмембранного потенциала в мВ.

1. Syomin F., Osepyan A., Tsaturyan A. Computationally efficient model of myocardial electromechanics for multiscale simulations // PloS ONE. 2021. V. 16 (7), e0255027.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНОВОГО РУСЛОВОГО ПОТОКА НАД НЕСВЯЗНЫМ ДНОМ

Потапов И.И.¹, Петров А.Г.², Епихин А.С.³, Сибгатуллин И.Н.³

¹Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

³Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

⁴Океанологический университет Китая, Китай

e-mail: potapov2i@gmail.com, britovad@ispras.ru

В работе [1] предложена математическая модель движения планового руслового потока над несвязным дном. Однако, ее использование в математических пакетах требует от дискретных расчетных областей (сеток) поддержки сетки в местной эволюционирующей во времени системе координат. При этом на каждом шаге по времени процесс перестройки местной расчетной сетки является самостоятельной задачей, часто весьма требовательной к вычислительным ресурсам.

Для уравнения, описывающего плановые деформации донной поверхности [1], найдены преобразования из местной системы координат в декартову систему координат. Преобразования выполнены в предположении о малых уклонах донной поверхности. Полученные уравнения позволяют решать задачу о деформации донной поверхности без регенерации расчетных сеток на каждом шаге по времени. Для решения полученного уравнения деформации донной поверхности на основе метода конечных элементов построен его дискретный аналог.

Получены численные решения модельной задачи об изменении донной поверхности в прямоугольной области под действие гидродинамической струи от корабельного винта рис. 1.

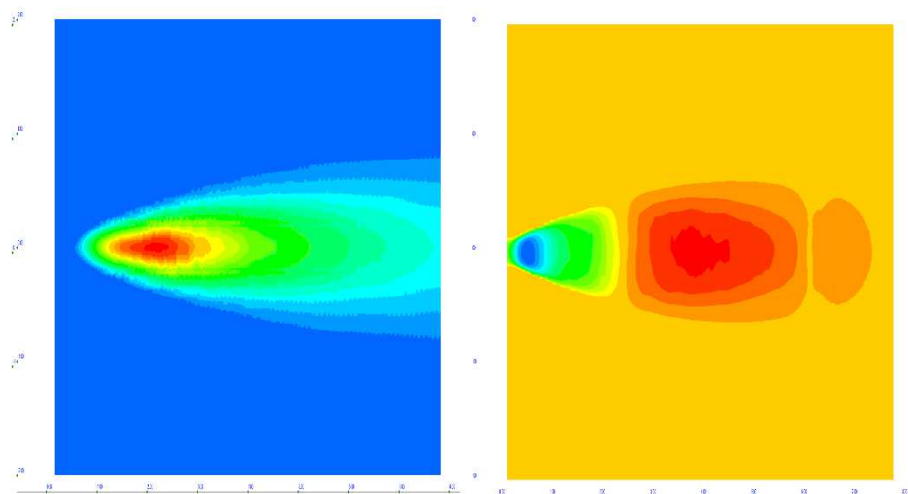


Рис.1 а. Модуль придонных касательных напряжений, возникающих на поверхности дна под воздействием струи от гребного винта судна; б. Деформация несвязной донной поверхности под воздействием придонных напряжений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-57-53019.

1. Petrov A.G., Potapov I.I. Selected Sections of Channel Dynamics. - Moscow.: Lenand, (2019). 244 p.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМ ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЬЁМ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ВБЛИЗИ ТВЁРДОЙ СТЕНКИ

Сиренко А.Г., Сутырин О.Г.

Кафедра гидромеханики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: sirenko.anas@yandex.ru

На основе уравнений Эйлера проведено численное моделирование взаимодействия ударной волны с газовым пузырем повышенной плотности вблизи твердой стенки. Применяется конечно-разностная схема МакКормака с добавлением искусственной вязкости Дэвиса. Описана газодинамика преломления падающей ударной волны и фокусировки поперечных и отражающихся от стенки скачков уплотнения. Показано, что импульсная ударно-волновая нагрузка на стенку существенно зависит от формы пузыря. На основе серии расчётов определены ключевые факторы, отвечающие за величину пиковых давления плотности на стенке: интенсивность вторичных ударных волн, наличие слоя тяжелого газа непосредственно у стенки и локализация области наиболее интенсивного взаимодействия волн по отношению к стенке. Установлено, что наиболее интенсивным воздействие на стенку оказывается при небольшом удлинении пузыря в направлении распространения ударной волны.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00307).

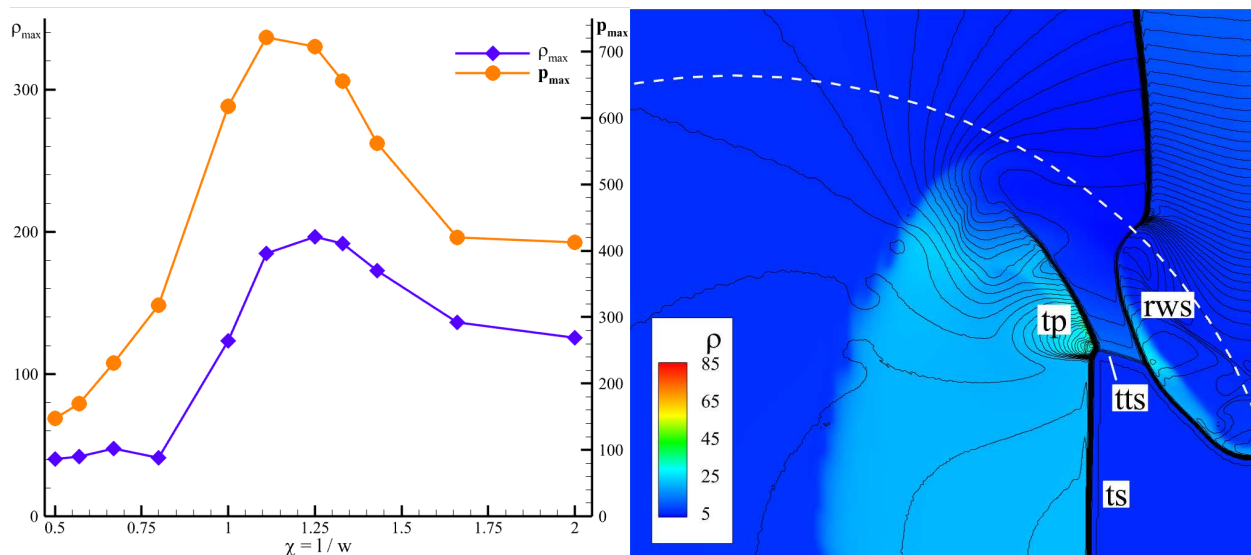


Рис. 1. Зависимость пиковых плотности и давления в центральной точке стенки от соотношения χ полуосей эллипсоидального пузыря (слева) и ударно-волновая конфигурация, обеспечивающая эффект повышения импульсной ударно-волновой нагрузки на стенку (справа, $\chi = 1.25$). Цветом показана плотность газа, изолиниями – давление. Нижняя граница рисунка – ось симметрии, правая – твёрдая стенка. Пунктирная линия – исходная граница пузыря. ts – прошедшая в пузырь ударная волна; tp – тройные точки; tts – поперечный скачок, образовавшийся в результате «опрокидывания» верхней части падающей ударной волны; rws – отражающийся от стенки скачок.

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Смирнова В.В., Саченков О.А.

Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
e-mail: yaikovavictoriya@mail.ru

Количественное описание изменения структуры костной ткани в условиях действия постоянной внешней нагрузки выступает одной из актуальных задач биомеханики. Данная проблема обуславливается перестройкой костной структуры. Методы описания механической устойчивости костей способствуют предотвращению образования патологических травм. В основе работы лежит предположение, что процесс адаптации возникает в условиях действия периодических нагрузок. Заключительным этапом выступает гомеостаз, определяющий постоянство внутренней среды при наличии нагружения. На тазобедренный сустав и проксимальный отдел бедра действуют различные нагрузки, создаваемые внешними воздействиями и усилиями мышц. В работе [1] рассматривалась модель проксимального отдела бедренной кости с силами совместной реакции и приводящей мышцы бедра. Влияние отводящей, латеральной и медиальной широкой мышц бедра представлено в работе [2]. Целью работы выступало моделирование перестройки проксимального отдела бедренной кости человека.

Анализ результатов численного расчёта показал, что на начальных этапах направления собственных векторов тензора структуры и тензора деформаций имеют значительные различия. На конечном этапе перестройки угол между данными векторами стремится к нулю, наблюдается явление гомеостаза. Приложение внешней нагрузки приводит к образованию концентратора напряжений в области соединения проксимального участка и диафиза. На основе полученных было определено, что гомеостаз наступает по истечению 5 суток.

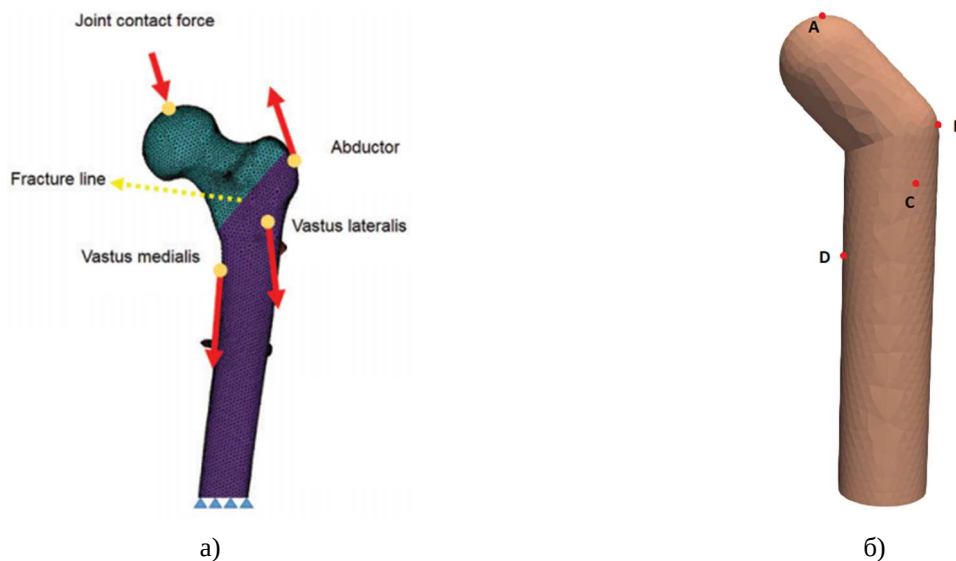


Рис. 1. Модель бедренной кости: а - граничные условия; б - конечно-элементная сетка.

1. Mukhin D.A. INFLUENCE OF DIFFERENT SCALES OF POROSITY ON MECHANICAL PROPERTIES OF BONE TISSUE / D.A. Mukhin, D.S. Lisenkov, E.V. Semenova, V.V. Yaikova, O.V. Gerasimov, T.V. Baltina, O.A. Sachenkov // Abstract Book Virtual WCO-IOF-ESCEO 2020, August 20-22, Barcelona, Spain. -2020. - P. 739.

2. Яикова В.В., Саченков О.А., Балтина Т.В., Балтин М.Э. Модель Коэна для описания формирования костной ткани // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред Материалы XXVI международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. - 2020. - Т. 2. - С. 125-126.

ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫЕ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОГО СЛОЯ, ТЕКУЩЕГО ПО ВРАЩАЮЩЕМУСЯ ДИСКУ

Могилевский Е.И.^{1,2}, Смирнов К.В.¹

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

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

e-mail: e.i.mogilevskiy@gmail.com, k.smirnov-33@yandex.ru

В работе представлены результаты наблюдений волн, которые возникают от небольших объектов, помещенных в слой вязкой жидкости, растекающейся по горизонтальному вращающемуся диску за счет инерции и центробежной силы. Цель работы состоит в определении границ применимости газогидродинамической аналогии и оценке влияния капиллярных эффектов на распространение волн. В частности, изучается возможность экспериментальной проверки результатов моделирования гидравлического прыжка на вращающемся диске [1].

Создана экспериментальная установка, которая позволяет реализовывать изучаемое течение. В качестве источника возмущений применяется вертикальная иголка, которая вносится в поток, на определенном расстоянии от оси вращения. Фиксируются возмущения свободной поверхности и проверяется, имеются ли при заданных параметрах волны, которые распространяются вверх по потоку в радиальном направлении.

В зависимости от локального числа Фруда и числа Бонда реализуется один из следующих сценариев: свободная поверхность гладкая; волновая структура соответствует капиллярным волнам на тонком слое; образуются косые скачки, угол наклона которых к вектору скорости соответствует скорости распространения большей, чем для гравитационных волн.

1. Ipatova A., Smirnov K., Mogilevskiy E. Steady circular hydraulic jump on a rotating disk // J. Fluid Mech. 2021. V. 927. A24.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Могилевский Е.И.^{1,2}, Смирнов К.В.¹

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

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

e-mail: e.i.mogilevskiy@gmail.com, k.smirnov-33@yandex.ru

Гидравлическим прыжком называется резкое изменение толщины слоя жидкости, текущего по твердой поверхности, которое сопровождается переходом от сверхкритического к докритическому режиму течения. В этих режимах скорость течения соответственно больше и меньше скорости распространения гравитационных волн. Гидравлический прыжок соответствует ударной волне в рамках газогидродинамической аналогии [1] и образуется, например, при натекании сверхкритического потока на препятствие. При растекании слоя жидкости от источника по горизонтальному диску прыжок образуется на некотором расстоянии [2], которое не может быть определено в рамках модели идеальной жидкости; оно отражает баланс инерционных, гравитационных и вязких сил [3]. В настоящей работе рассматривается влияние дополнительной силы, ускоряющей жидкость, которая отсутствует при течении по горизонтальному диску, изучается ее влияние на положение и структуру прыжка. Работа расширяет и продолжает исследование [4], в котором анализируется влияние вращения диска в ситуации с плоской поверхностью.

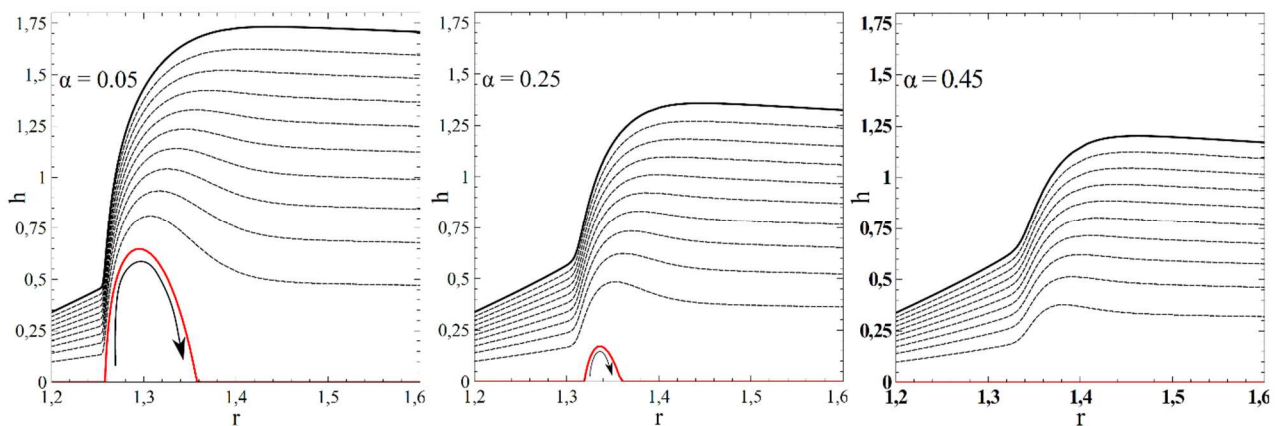


Рис. Линии тока и наличие вихря.

В данной работе рассматривается течение тонкого слоя вязкой жидкости по внешней поверхности сферы. Решаются осредненные по толщине уравнения тонкого слоя, при этом для осреднения используется одно- и двухпараметрический профиль скорости. Последний подход позволяет построить непрерывный переход между областями, в которых наблюдаются различные соотношения между основными физическими факторами. Проведен сравнительный анализ данных подходов между собой, а также с результатами расчетов полных уравнений Навье-Стокса и экспериментов [5]. Оба подхода показали хорошее совпадение с экспериментальными данными радиусов прыжка, двухпараметрический профиль предсказывает такую же структуру линий тока, как и полные уравнения Навье-Стокса.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. ГРФМЛ. 2000. С. 733.
2. Rayleigh On the theory of long waves and bores// Proc. R. Soc. Lond. A 1914. V. 90 №619, P. 324-328.
3. Bohr T., Dimon P., Putkaradze V. Shallow-water approach to the circular hydraulic jump // J. Fluid Mech. V. 254, P. 635–648.
4. Ipatova A., Smirnov K., Mogilevskiy E. Steady circular hydraulic jump on a rotating disk // J. Fluid Mech. 2021. V. 927. A24.
5. Saberi A, Teymourtash A.R., Mahpeykar M.R. Experimental and numerical study of circular hydraulic jumps on convex and flat target plates//European Journal of Mechanics - B/Fluids. V. 80. 2020. P. 32-41.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИЧИЙ КОНВЕКЦИИ В СУХОМ И ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Сомов С.А., Иванов А.С.
ИМСС УрО РАН, Пермь
e-mail: csomov@mail.ru

Как известно при сравнении сухого и влажного воздуха, а также при различных вычислениях применяют одинаковые числа Рэлея так как они оказываются близки. Однако, если принять в расчёт испарение воды в одной области пространства и конденсацию водяного пара в другой части, то это в значительной мере изменять конвективные течения. При этом экспериментальных данных, описывающих отличие конвективных течений в сухом воздухе с одной стороны и влажном воздухе при конденсации/испарении, не существует.

Таким образом в данном исследовании предприняты попытки обнаружения отличительных особенностей конвекции сухого и влажного воздуха, вызванных изменением концентрации водяного пара в результате его испарения/конденсации в условиях, приближенных к нормальным. Для этого была спроектирована и смонтирована экспериментальная установка для исследования конвекции в конвективной ячейке с воздухом.

Первая часть исследования проводилась с предварительно осушенным воздухом. Для осушения воздуха внутри измерительной ячейки была собрана вспомогательная установка, которая прогоняла воздух из ячейки с помощью маломощного электронасоса через герметичный контейнер, заполненный силикагелем. Результирующее значение относительной влажности внутри экспериментальной камеры варьировалось в диапазоне 4-7%, в то время как относительная влажность окружающего воздуха превышала 50%. После этого проводились интерферометрические измерения конвективных потоков внутри экспериментальной ячейки. Также данные получались с термопар, расположенных вдоль стенок исследуемой ячейки и теплоток с датчика, расположенного на нижнем теплообменнике.

Вторая часть исследования проводилась с насыщенным воздухом влажность которого составляла 99-100%, что позволяло создать условия конденсации/испарения. Такие значения влажности были достигнуты с помощью нанесения и испарения слоя жидкости с нижнего теплообменника.

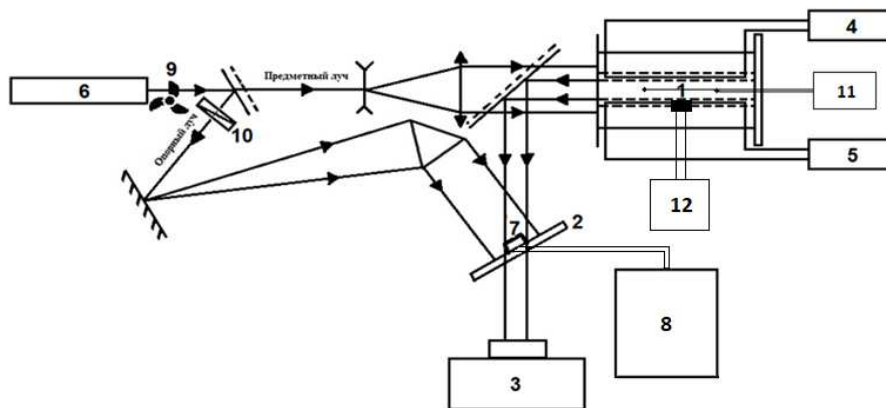


Рис. Схема экспериментальной установки: 1 – измерительная ячейка, заполненная сухим или влажным воздухом; 2 – голографическая пластинка; 3 – видеокамера; 4 – теплообменник и термостат холодильника; 5 – теплообменник и термостат нагревателя; 6 – He-Ne лазер; 7 – датчик; 8 – селективный нановольтметр Unipan type 237; 9 – обтюратор; 10 – поляризатор; 11 – ЛА-И24USB, 12 – датчик теплотокота.

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости М.: Наука. 1972.
2. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М: Мир. 1973. С. 242.
3. Somov S. A., Ivanov A. S. Experimental Setup for Studying Thermosolutal Convection in Moist Air // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019.
4. Somov S. A., Ivanov A. S., Goncharov M. M., Kondrashov A. N. Experimental study of thermal convection in dry air by holographic interferometry method // J. Phys.: Conf. Ser. 2021.

СУБГАРМОНИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА, ПЕРИОДИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННОГО В НАПРАВЛЕНИИ РАЗМАХА

Старцев Н.И.^{1,2}, Никитин Н.В.²

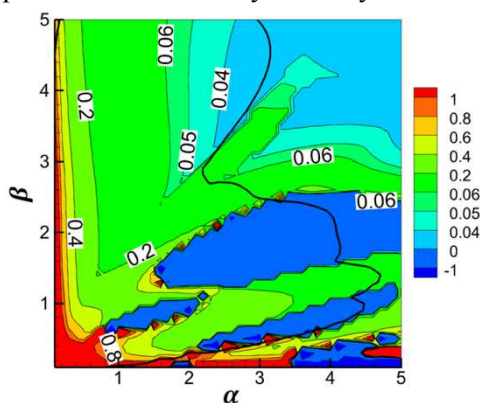
¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

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

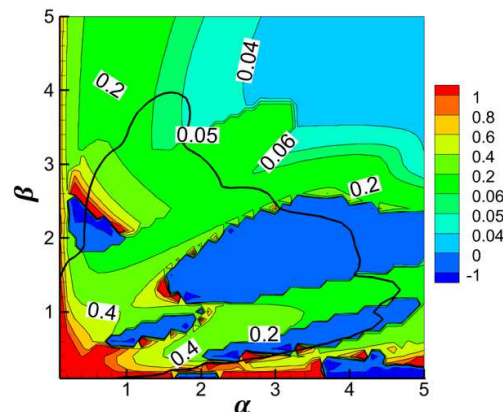
e-mail: startsev.nikolay00@gmail.com

Считается, что турбулентность в пристенных течениях поддерживается посредством периодического возникновения долгоживущих организованных структур. Эти структуры выглядят как продольные полосы, модулирующие течение в направлении размаха. Модулированное течение теряет устойчивость по отношению к мелкомасштабным возмущениям, которые посредством некоторого нелинейного механизма поддерживают существование структур. В качестве самой приближённой модели описанного процесса в [1] Фабиан Валеф (Fabian Waleffe) предложил рассмотреть устойчивость плоского течения Куэтта, профиль скорости которого периодически модулирован в направлении размаха под действием цепочки продольных вихрей. Оказалось, что такое модулированное течение неустойчиво при определённых значениях параметров модуляции. При этом нелинейное взаимодействие неустойчивых возмущений даёт положительный вклад в генерацию энергии продольных вихрей, вызывающих модуляцию течения.

В цитированной работе Ф. Валефа рассмотрены лишь фундаментальные моды устойчивости, т.е. возмущения с тем же периодом в направлении размаха, что и основное модулированное течение. В данной работе проведено исследование субгармонической устойчивости течения, т.е. устойчивости по отношению к возмущениям, имеющим вдвое больший период. Обнаружено, что субгармоническая неустойчивость слабее фундаментальной – имеет меньшие коэффициенты роста, возникает при большей степени модуляции. Однако, субгармонические возмущения имеют больший потенциал обратного влияния на вызывающие модуляцию течения продольные вихри, т.е. поддержка вихрей возникает при меньшей амплитуде возмущений.



Пороговая амплитуда возмущений
для фундаментальных мод, $Re = 1000$



Пороговая амплитуда возмущений
для субгармонических мод, $Re = 1000$

Полученные результаты указывают на то, что рассмотренный в работе тип неустойчивости может быть основным механизмом самоподдержания турбулентных пульсаций в более реалистичных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 22-21-00184 с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

1. F.Waleffe, On a self-sustaining process in shear flows // Phys. Fluids 9, 883 (1997).

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Стеклов А.С.

АО "Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И.И. Африкантова", Нижний Новгород
e-mail: steklov@okbm.nnov.ru

Наметившаяся устойчивая тенденция перехода от стратегии эксплуатации атомной техники «по ресурсу» к эксплуатации «по состоянию» требует повышенного внимания к техническому состоянию энергетических систем. Постоянное повышение удельных параметров вновь разрабатываемых атомных энергетических систем (АЭС) происходит за счет снижения запасов прочности, устойчивости и приводит к работе систем на предельных режимах, что объективно повышает риски возникновения отказов [1].

В данном аспекте диагностика заключается в последовательном решении двух задач: идентификации состояния каждого элемента атомной энергетической системы в определенный момент времени по измеряемым датчиками параметрам и классификации состояния элементов, т.е. определение соответствия состояния элемента АЭС одному из классов (исправен, неисправен, работоспособен и т.д.). Учитывая специфические особенности объекта диагностики, как сложной технической системы с нелинейными характеристиками, обе эти задачи могут быть эффективно решены с применением математического аппарата искусственных нейронных сетей.

Решение задачи оценки технического состояния насосного оборудования показано на примере возникновения отказа «повышенная вибрация насосного оборудования». Штатная система контроля параметров насосного оборудования только информирует персонал об уже случившемся факте отказа, не давая возможности предотвратить его.

Таким образом, существует проблема создания новых интеллектуальных автоматизированных систем оценки технического состояния насосного оборудования, способных эффективно распознавать зарождающиеся отказы, прогнозировать их развитие, и совместно с системами автоматического управления минимизировать их влияние на работоспособность энергетической установки либо своевременно информировать персонал.

Перечисленные задачи могут быть эффективно решены с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) - мощного метода имитации процессов и явлений, позволяющего воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости и преодолеть «проклятие размерности» при обработке большого числа переменных. ИНС, состоящие из действующих параллельно простых элементов (нейронов), основаны на простой биологической модели нервной системы человека и могут выполнять функции, которые являются трудными как для традиционных компьютеров, так и для человека.

Для решения задач выбрана вероятностная ИНС Probabilistic Neural Network (PNN) с радиально-базисной функцией активации. Структура создаваемой сети приведена на рис. 1.

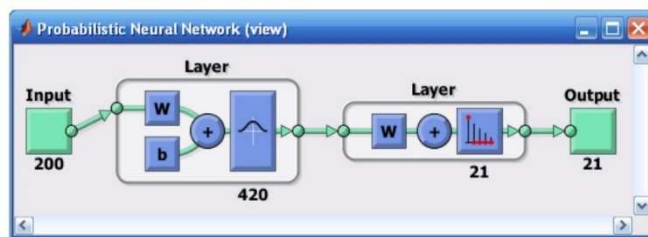


Рис. 1. Структура создаваемой сети Probabilistic Neural Network в MATLAB.

1. Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных электротехнических комплексов. г. Нижний Новгород, Монография Типография НГТУ, 2018 г.

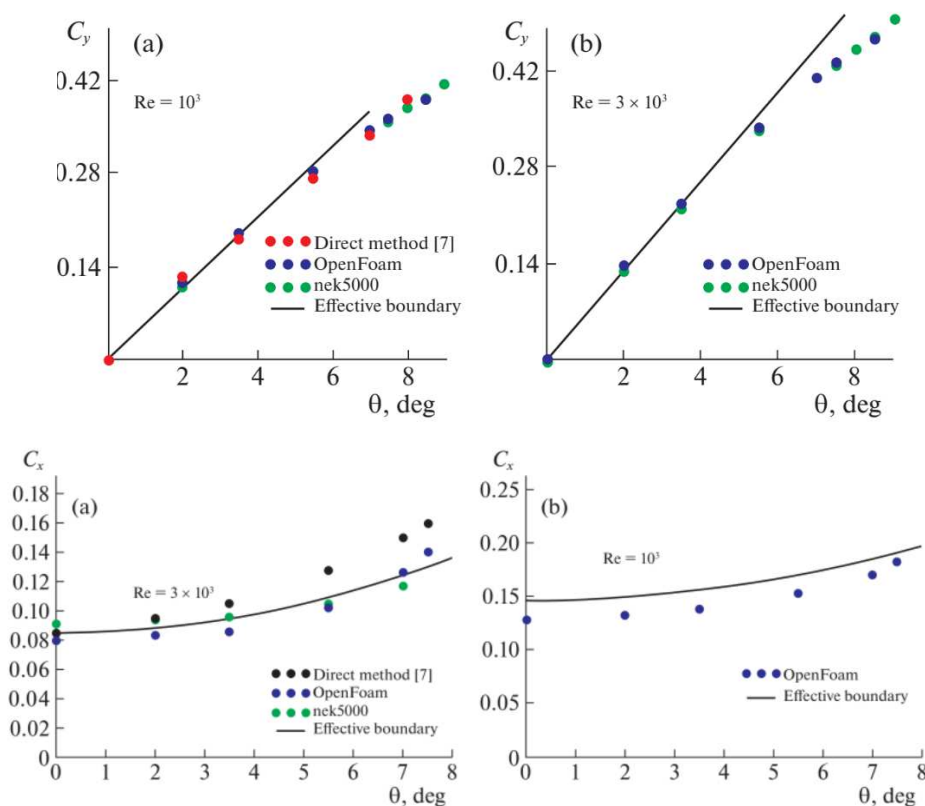
2. Стеклов А.С. Варианты построения систем прогнозирования. В сборнике: НАУКА СЕГОДНЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА Материалы международной научно-практической конференции. 2017. С. 45-46.

ЛАМИНАРНОЕ ОБТЕКАНИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КОНТУРОВ ПОД УГЛОМ АТАКИ

Сухов А.Д., Петров А.Г., Сибгатуллин И.Н., Епихин А.С.
Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского, Москва
e-mail: petrovipmech@gmail.com

Рассмотрена плоская задача о вязком ламинарном обтекании эллиптических цилиндров под углом атаки. Путем решения уравнений ламинарного пограничного слоя методом локального подобия Лойцянского находятся касательные напряжения на границе эллипса и в точках отрыва. Из равенства скоростей в точках отрыва находится циркуляция и строится полное решение задачи о полях скорости и давления вне пограничного слоя. Найдены коэффициенты подъемной силы и сопротивления в зависимости от угла атаки и соотношения осей эллипса. Теоретические результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными и прямыми численными решениями уравнений Навье-Стокса. Для коэффициентов сопротивления и подъемной силы получены интерполяционные формулы как функции отношений осей эллипса b_{el} , угла атаки θ и числа Рейнольдса Re . Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ и NSFC, номера проекта 21-57-53019.

$$C_x = -0.07 + 0.95b_{el} - 1.25b_{el}^2 + 0.001\theta^2 + \\ + (400b_{el}^2 - 111.6b_{el} + 8.82)\sqrt{\frac{1}{Re}} + (-8700b_{el}^2 + 2940b_{el} - 162)\frac{1}{Re}, \\ C_y = -3.81b_{el}^2 + 0.9945b_{el} + 0.02165 + \\ + (472.44b_{el}^2 - 142.5b_{el} + 9.112)\sqrt{\frac{1}{Re}} + (-10080b_{el}^2 + 3081b_{el} - 213.3)\frac{1}{Re}.$$



На рисунках показаны сопоставления интерполяционных формул с численными расчетами.

1. A. G. Petrov, A. D. Sukhov, and I. N. Sibgatullin, Laminar Flow of Viscous Fluid Around Elliptical Contours at an Angle of Attack// Lobachevskii Journal of Mathematics, 2022, Vol. 43, No. 5, pp. 1188-1198.

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГОРЮЧЕМ ГАЗОВОМ ПУЗЫРЕ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ

Сутырин О.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 в газе с горючим газовым пузырем повышенной плотности. Численный метод основан на классической конечно-разностной схеме WENO5-JS, дополненной специальным методом аппроксимации уравнения переноса показателя адиабаты газа. Реакция горения газовой смеси моделируется с помощью двухстадийной кинетики Коробейникова-Левина. Описаны три качественно различных режима инициирования детонации: прямое инициирование в передней части пузыря при достаточно высоких числах Маха падающей волны и инициирование детонации в результате преломления волны и фокусировки вторичных скачков уплотнения в задней части пузыря при меньших числах Маха. Показано, что режим инициирования детонации существенно зависит как от интенсивности ударной волны, так и от плотности смеси в пузыре: увеличение плотности смеси приводит к уменьшению пороговых чисел Маха. На основе серии расчетов построена диаграмма режимов инициирования детонации и показано, что эффект фокусировки ударной волны позволяет достичь успешного инициирования детонации при многократно меньшей интенсивности падающей волны по сравнению с прямым инициированием. В наиболее эффективной конфигурации пороговое число Маха снижается вплоть до $M = 1.3$. Столь существенное снижение пороговой интенсивности ударной волны при взаимодействии с пузырем может быть положено в основу разработки новых методов газодинамического инициирования детонации в перспективных системах высокоскоростного сгорания.

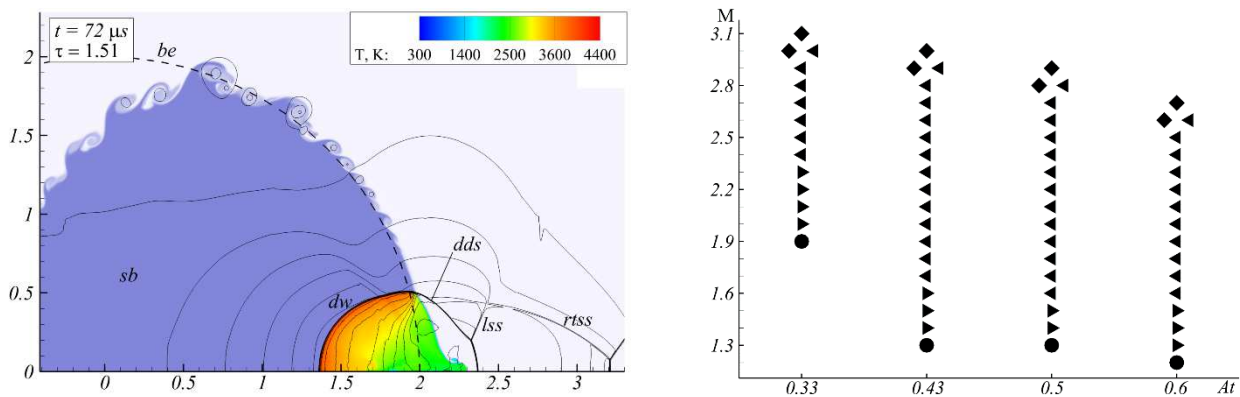


Рис. 1. Воспламенение горючего газового пузыря при фокусировке вторичных ударных волн (слева, $M = 1.4$, $At = 0.5$) и диаграмма режимов воспламенения в зависимости от плотности смеси и интенсивности падающей волны (справа). Изолинии давления, показатель адиабаты газа, цветом показана температура (только $T > 1100\text{K}$). Координаты в сантиметрах, пунктирная линия – исходная граница пузыря. Нижняя граница рисунка – ось симметрии. *bis* – падающая ударная волна (движется слева направо), *dw* – детонационная волна, *dds* – вызванная детонацией ударная волна, *sb* – ударно-сжатый пузырь.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00307).

ГЕМОДИНАМИКА БИФУРКАЦИОННОЙ АНЕВРИЗМЫ АБДОМИНАЛЬНОГО ОТДЕЛА АОРТЫ

Тихвинский Д.В.¹, Карпенко А.А.^{1,2}, Чупахин А.П.¹, Паршин Д.В.¹

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

²НМИЦ им. ак. Е.Н. Мешалкина, Новосибирск

e-mail: nabster98@yandex.ru

Бифуркационные аневризмы абдоминального отдела аорты являются широко распространенным заболеванием: от 1.5% до 5% людей старше 65 лет имеют данную патологию [1]. Целью данной работы является изучение гемодинамики бифуркационной аневризмы абдоминального отдела аорты. В последнее десятилетие для решения обозначенных проблем всё чаще применяются методы предоперационного моделирования, в частности вычислительная гидродинамика (CFD), в особенности подходы FSI.

По DICOM-изображениям реальных пациентов, проходивших лечение в НМИЦ им. Е.Н. Мешалкина, были восстановлены 30 геометрий аорты. Эти данные были использованы для нахождения диаметров аневризмы аорты и подвздошных артерий, а также их статистического анализа. В итоге были построены 9 идеализированных конфигураций с аневризмой и 9 здоровых (без аневризмы) конфигураций.

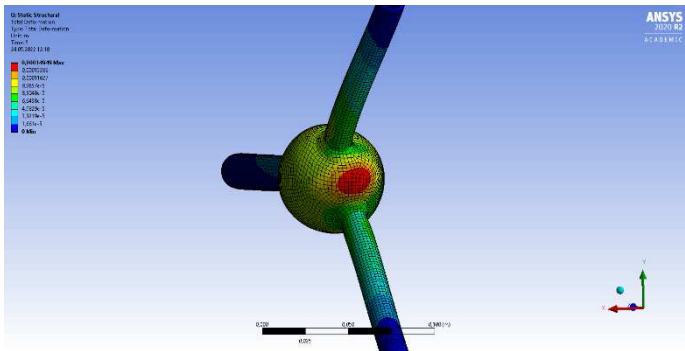


Рис. Деформация стенки аорты одной из конфигураций в результате FSI-моделирования.

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. В ходе численного 3D моделирования был обнаружено немонотонное поведение функции вязкой диссипации в конфигурации при радиусе аневризмы равной примерно 3.7см, что соответствует предельной наблюдаемой в клинике величине аневризмы (при таком размере показана немедленная операция).

По результатам FSI-моделирования (данные об эластических свойствах сосудов взяты из [3]) получено распределение деформаций стенки как в конфигурациях с аневризмой, так и в конфигурациях без аневризмы аорты.

Полученные результаты планируется применять для дальнейшего развития и верификации авторского комплексного предсказательного фреймворка –ассистента принятия врачебных решений. Мы считаем, что для этого необходимо иметь результаты большого массива расчетов на элементарных конфигурациях (для улавливания общих эффектов), и результаты расчетов в пациент-специфической постановке (для разбора особенностей той или иной конфигурации).

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 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. А.И. Липовка, А.А. Карпенко, А.П. Чупахин, Д.В. Паршин. Исследование прочностных свойств сосудов абдоминального отдела аорты: результаты экспериментов и перспективы. ПМТФ, (2022), No 2, С. 84-93.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЗНОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МЕЛКОЙ ВОДЫ

Тимош П.С., Потапов И.И.
ВЦ ДВО РАН, Хабаровск
e-mail: pavel.timosh@yandex.ru

Предлагается при решении задачи мелкой воды использовать метод, реализованный на основе центрально-разностной по пространству и явной одношаговой по времени схемы, устойчивость которой достигается методом FCT [1]. Тестирование предложенного алгоритма произведено на задаче об изменении уровня свободной поверхности при разрушении цилиндрического столба несжимаемой невязкой жидкости в мелком бассейне.

Тестирование показало, что предложенный метод является устойчивым, сравним по точности с методом Мак-Кормака превосходя его по производительности.

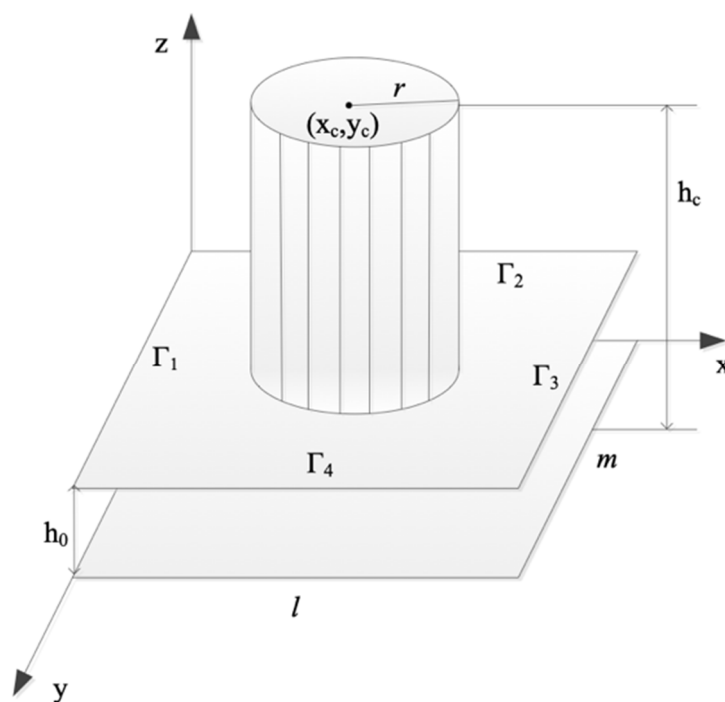


Рис. Схема расчетной области.

1. Потапов И.И., Тимош П.С. Об использовании центрально-разностной схемы для решения задачи газовой динамики. // Информатика и системы управления. 2021; 2(68): 17–22. DOI:10.22250/isu.2021.68.17-22.

ФАЗОВОЕ ОПИСАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В СМЕЖНЫХ ЯЧЕЙКАХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Тюлькина И.В.¹, Голдобин Д.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: irinatiulkina95@gmail.com

При исследованиях общих закономерностей сложного поведения нелинейных систем особое внимание привлекают коллективные явления в ансамблях связанных элементов, такие как синхронизация. Для характеристики синхронности используется понятие фазы. Динамика таких систем представляет интерес для многих приложений в физике, в том числе в гидродинамике. Здесь интересны системы, в которых собственная динамика элементов ансамбля проста, а сложность возникает как следствие их сетевого взаимодействия. С точки зрения вопросов управления и самоорганизации важны ситуации, когда коллективные явления возникают именно при слабой связи между элементами или несильном воздействии на них.

Ранее были исследованы течения в тонком слое пористой среды, вызванные локализованным источником тепла или примеси, также были изучены режимы поведения системы [1]. В работе [2] было построено коллективное фазовое описание колебательной тепловой конвекции в ячейках Хеле-Шоу и описана динамика колебательной конвекции в системе.

В данной работе строится фазовое описание колебательной термоконцентрационной конвекции с учетом эффекта Соре в смежных горизонтальных прямоугольных ячейках пористой среды, подогреваемых снизу (см. рис.). Горизонтальные границы ячеек полагаются непроницаемыми (в том числе для примеси), тепловой поток через них – фиксированным. Вертикальные границы имеют малую теплопроводность. Уравнения для тепловой конвекции учитывают эффект Соре. Уравнения фазы колебаний выводятся с использованием метода многих масштабов. В рассматриваемой системе есть слабое распределенное источника тепла, описывающее теплообмен между ячейками. Отсюда получаем уравнения конвекции Соре в ячейках со связью через температурное поле. Используя метод многих масштабов, можно получить уравнения для длинноволновой конвекции. Затем вывести уравнения для амплитуды колебательных мод со связью и из них получить уравнения для фаз колебаний, что является ключевыми уравнениями фазового описания. В будущем к этой задаче планируется применить метод круговых кумулянтов для описания коллективной динамики [3].

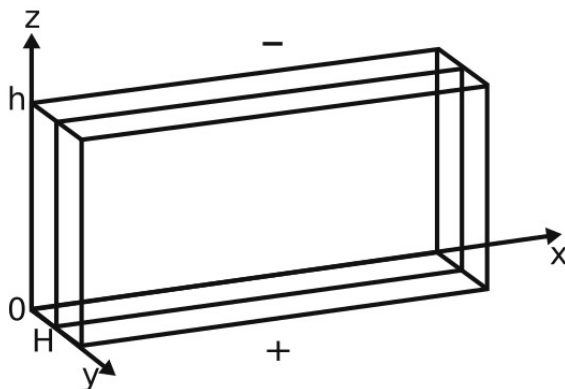


Рис. Геометрия задачи.

Работы выполнены в рамках бюджетной темы № 121112200078-7.

1. Goldobin D.S., Lyubimov D.V. Soret-Driven Convection of Binary Mixture in a Horizontal Porous Layer in the Presence of a Heat or Concentration Source // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2007. Vol. 104(5). P. 830.

2. Kawamura Y., Nakao H. Collective phase description of oscillatory convection // Chaos. 2013. Vol. 23. 043129.

3. Tyulkina I.V., Goldobin D.S., Klimenko L.S., Pikovsky A. Dynamics of Noisy Oscillator Populations beyond the Ott-Antonsen Ansatz // Physical Review Letters. 2018. Vol. 120. 264101.

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Трефилов И.А.^{1,2}, Юрина А.Д.¹, Сафарян К.А.¹, Мельников Р.М.¹

¹Физический факультет ПГНИУ, Пермь

²ООО «Инверсия Сенсор», Пермь

e-mail: igortrefilov59@gmail.com

Для увеличения межремонтного периода и сведения к минимуму вероятности отказа фланцевого соединения во время эксплуатации требуется отслеживать и анализировать их текущее состояние, а также прогнозировать возникновение утечки герметизируемой среды. Одним из подходов к решению этой задачи является использование внешних систем диагностики.

Примером такой системы является интеллектуальное уплотнение [1, 2]. В основе технического решения используется уплотнение из упруговязкого материала – терморасширенного графита – и оптоволоконных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), необходимых для измерения деформаций изделия в ходе проведения монтажа и эксплуатации.

Для сокращения издержек на отработку эффективной формы уплотнения и упрощения интерпретации оптических сигналов проводилось численное моделирование осевого сжатия уплотнения.

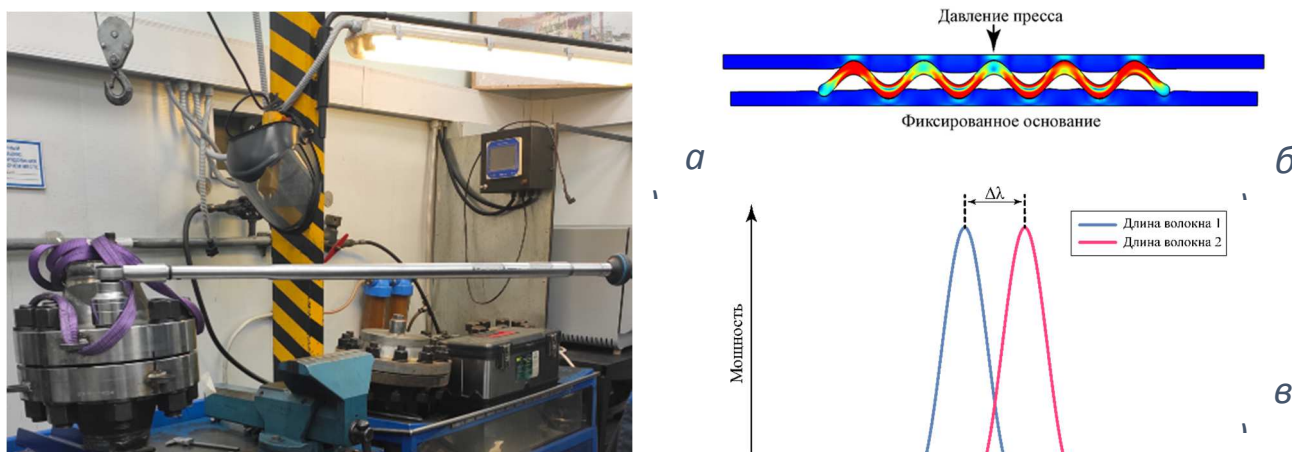


Рис. 1. а) фланцевое соединение во время затяжки с использованием динамометрического ключа, б) схема нагружения уплотнения, в) график зависимости мощности от длины волны смоделированного сигнала ВБР.

На Рисунке 1в приведен спектр смоделированного сигнала ВБР, отображающий реакцию на удлинение оптоволокна. При увеличении длины оптоволокна резонансная длина волны пропорционально увеличивается. Полученные результаты численного эксперимента проходили процесс валидации данными натурных испытаний.

Модель используется для исследования зависимости изменения параметров оптоволокна с ВБР, интегрированного в конструкцию интеллектуального уплотнения, от величины внешней нагрузки. Выполнено моделирование поведения уплотнения при осевом сжатии. Полученные результаты позволяют построить математическую модель уплотнения, на основании которой возможно разработать способ оценки неравномерности степени обтяжки в процессе установки во фланцевое соединение.

Показана принципиальная возможность оценки степени деформации на основании показаний ВБР. Смоделированы электромагнитные поля в оптоволокне. Дальнейшие исследования лягут в основу проектирования измерительной системы оценки состояния фланцевых соединений во время эксплуатации.

1. Исаев О.Ю. и др. Интеллектуальное уплотнение для контроля состояния разъемных соединений. – 2019. Номер патента: RU 2702456 С1. Заявл. 12.09.2018; Оpubл. 08.10.2019.

2. Исаев О.Ю. и др. Контроль состояния уплотнения из терморасширенного графита на базе оптоволоконных технологий //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20. – №. 4. – С. 34- 42.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА С ДИФFUЗОРНЫМИ И КОНFUЗОРНЫМИ КАНАЛАМИ

Трифонов В.В., Решмин А.И., Луцик В.Г., Тепловодский С.Х.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: trifonov@imec.msu.ru

Проведены численные и экспериментальные исследования течения в кольцевом и коническом канале переменного сечения. Течение предполагалось безотрывным, поэтому рассматривались только небольшие углы наклона стенок канала. Для чисел Рейнольдса в диапазоне 3000-10000 рассчитаны профили скорости, энергии турбулентности, напряжений Рейнольдса и определяемые ими характеристики турбулентного теплообмена. Расчеты показали сильное влияние угла раскрытия канала на турбулентные характеристики потока. Увеличение интенсивности турбулентности в случае подвода тепла к стенке приводит к увеличению характеристик теплообмена. При использовании такого канала в теплообменном аппарате можно, не применяя искусственную турбулизацию потока, увеличить число Нуссельта и коэффициента аналогии Рейнольдса по сравнению с каналом постоянного сечения при тех же числах Рейнольдса.

Расчеты проведены с применением трёхпараметрической дифференциальной модели турбулентности [1], дополненной уравнениями для турбулентного переноса тепла, проведено численное исследование течения и теплообмена в кольцевом и коническом каналах с различной степенью расширения. В качестве теплоносителя рассматривался вода.

Показано, что в расширяющихся каналах (кольцевом и коническом) при всех рассмотренных изменениях угла раскрытия и чисел Рейнольдса основные характеристики теплообмена – число Нуссельта и коэффициент аналогии Рейнольдса – оказываются выше, чем в сужающихся каналах, при том же числе Рейнольдса. Это превышение возрастает с увеличением угла раскрытия.

С помощью численного моделирования были определены характеристики экспериментальной установки теплообменника с диффузорными каналами работающей по схеме с противотоком теплоносителей (т.е. направления потоков горячего и холодного теплоносителя в теплообменнике противоположны). Также в зависимости от положения вентелей-переключателей данная установка может работать в двух режимах, а именно диффузор в диффузоре или конфузор в конфузоре.

В работе представлены измеренные характеристики теплообмена для двух этих режимов, а также сравнения их с расчетными данными.

Интенсификация теплообмена в таком теплообменнике с диффузорными каналами достигается без заметного роста коэффициента трения. Это является принципиальным отличием рассмотренного способа интенсификации теплообмена от многих известных способов, где увеличение теплоотдачи достигается ценой значительного роста гидравлических потерь.

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

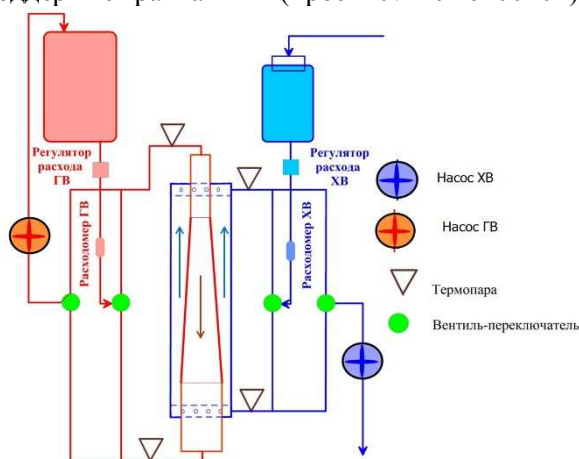


Рис. Схема экспериментальной установки.

1. Lushchik V. G., Pavel'ev A. A., Yakubenko A. E. Three-parameter model of shear turbulence: heat transfer calculations // Fluid Dyn. 1986. Vol. 21. pp. 200–211.

КОНТАКТНЫЕ УГЛЫ ДВУХВАЛКОВЫХ МОДУЛЕЙ

Тургунов К.К., Аннаев Н.У., Холтураев Ф.С.

¹Ташкентский архитектурно строительный институт, Узбекистан, Ташкент
e-mail: shavkat-xurramov59@mail.ru

Любой технологический процесс в валковых машинах осуществляются в их основном рабочем органе – в двухвалковом модуле, в результате контактного взаимодействия обрабатываемого материала с парами валков. Поэтому проблемы совершенствования действующих и разработки новых валковых технологических машин тесно связаны с решением задач теории контактного взаимодействия в двухвалковых модулях.

Одним из основных задач теории контактного взаимодействия в двухвалковых модулях является математическое моделирование углов контакта каждого валка, так как эти углы являются основными величинами, определяющими начальные и граничные условия в задачах контактного взаимодействия.

На сегодняшний день отсутствуют общепринятые модели и условия оценки углов контакта в асимметричных двухвалковых модулях. Некоторые из существующих модулей и условий оценки касаются только одного вида несимметричности в двухвалковом модуле, другие рассматривают одновременно два вида несимметричности, однако комплексный подход, учитывающий все возможные виды несимметричности отсутствует. Поэтому решение задач контактного взаимодействия в двухвалковых модулях базируются на сегодняшний день в основном на недостаточно полно отражающем процессе контактного взаимодействия и некорректно поставленным граничным условиям, что вызывает значительные искажения расчетных величин параметров двухвалковых модулей технологических машин.

В работе приведены результаты теоретического определения и оценки контактных углов двухвалковых модулей в начале контакта и в установившемся процессе.

Рассмотрен обобщенный двухвалковый модуль, в котором валки расположены относительно вертикали наклоном справа под углом, имеют неравные диаметры и эластичные покрытия из материалов с различными жесткостями и коэффициентами трения. Слой материала имеет равномерную толщину и подан наклоном вниз относительно линии центров (линия, соединяющая центры вращения валков) под некоторым углом.

Получены, аналитические формулы для определения контактных углов в обобщенном двухвалковом модуле в случаях, когда оба валка приводные, и когда верхний валок свободный. Эти формулы являются общими. Так как они определяют углов контакта для всех частных случаев взаимодействия слоя материала с парами валков в двухвалковом модуле технологических машин.

1. Хуррамов Ш.Р., Холтураев Ф.С., Курбанова Ф.З. Теоретический анализ условий захвата в асимметричном двухвалковом модуле // Известия высших учебных заведений, Технология текстильной промышленности – Иванова, 2021. – №4 (394). – С. 159-163.

2. Хуррамов Ш.Р., Холтураев Ф.С., Курбанова Ф.З. Особенности геометрических условий в двухвалковых модулях с одним приводным валком // Научно-технический журнал ФерПИ. – Фергана, 2019. – №2 (23). – С.52-56.

МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКНИСТЫХ БИМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ И МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

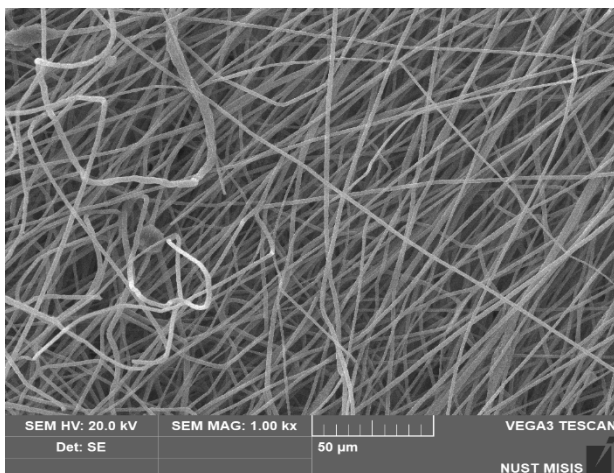
Тюбаева П.М.^{1,2}, Ольхов А.А.^{1,2}, Попов А.А.^{1,2}

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

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

e-mail: polina-tyubaeva@yandex.ru

В последние годы нанокмпозиционные волоконные материалы с ценными функциональными свойствами находят широкое применение в различных областях, в том числе: материалы для фотоники, генной терапии, биомедицины [1]. Большой научный и практический интерес представляет исследование структурных особенностей биополимерных волокон, модифицированных различными добавками, позволяющих варьировать их важнейшие свойства и эксплуатационные характеристики. Одним из наиболее перспективных методов получения материалов с контролируемой морфологией и геометрией волокон в слое материала является электроформование [2]. Целью данной работы было рассмотрение особенностей структуры ультратонких волокон на основе поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ) и модифицирующей добавки природного происхождения – гемина.



Микрофотография волокнистого материал,
полученного методом электроформования на основе
ПГБ и гемина.

В результате серии были установлены ключевые закономерности, позволяющие детально описать деформационные процессы, протекающие, как в материале, так и в одельных волокнах.

Было установлено, что деформационные свойства волокон на основе ПГБ в большой степени зависят от организации надмолекулярной структуры, на которую в значительной степени влияет модифицирующая добавка. Выработка волокон методом электроформования способствует формированию локальных напряжений в макромолекулах полимера [3]. Воздействие на эти области за счет введения модифицирующих добавок ведет к реорганизации надмолекулярной структуры и снятию этих напряжений, что обуславливает существенный рост физико-

механических характеристик.

Полученные данные позволяют моделировать надмолекулярную структуру волокон на основе ПГБ для медицинских изделий таким образом, чтобы обеспечить заданные физико-механические свойства, а также с высокой точностью предсказать характер деформирования и разрушения материала.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента МК-1651.2022.1.3.

1. Ding J., Zhang J., Li J., Li D., Xiao C., Xiao H., Yang H., Chen X. Electrospun polymer biomaterials. // Progress in Polymer Science, 2019, 90, pp. 1-34.

2. Филатов Ю. Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). М.: Нефть и Газ, 1997.

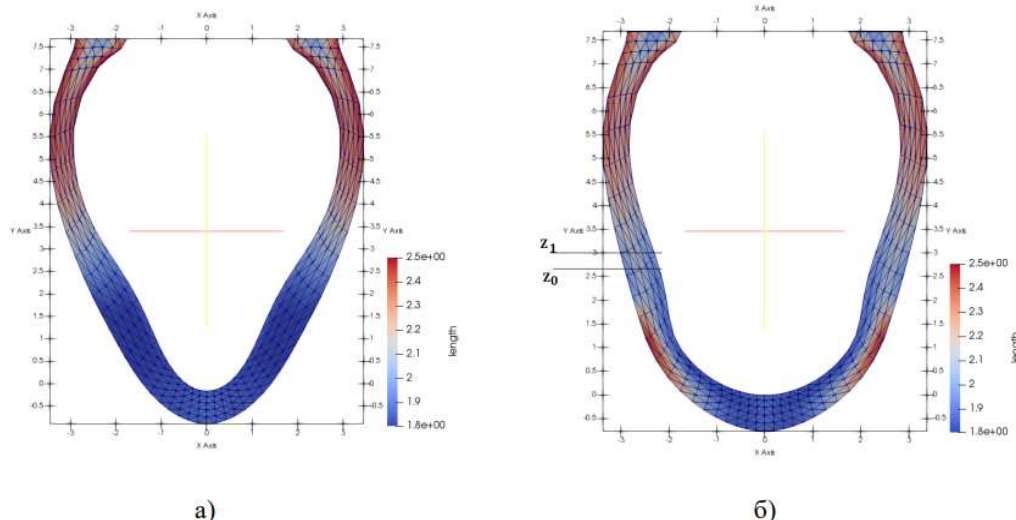
3. Tyubaeva P., Zykova A., Podmasteriev V., Olkhov A., Popov A., Iordanski A. The investigation of the structure and properties of ozone-sterilized nonwoven biopolymer materials for medical application. // Polymers, V. 13, № 8, 2021, Номер статьи 1268.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА: ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ СТИМУЛЯЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ЕГО НАСОСНУЮ ФУНКЦИЮ

Хабибуллина А.Р., Сёмин Ф.А., Цатурян А.К.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: khabibullina14@mail.ru

В докладе представлена осесимметричная модель левого желудочка (ЛЖ) сердца в системе кровообращения. ЛЖ приближали телом вращения, материал стенки которого описывали с помощью электромеханической модели сердечной мышцы [1], а остальные камеры сердца и сосудистое русло задавали моделью с сосредоточенными параметрами. Особенностью используемой клеточной модели мышцы является то, что изменения биохимических переменных модели, определяющих активные механические напряжения, описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений, а электрофизиология сердечной мышцы описывается феноменологической моделью всего с двумя переменными, что позволяет существенно сократить время расчета. Несмотря на упрощения, модель хорошо воспроизводит динамику электрического возбуждения и следующего за ним механического сокращения миокарда в различных режимах работы, включая зависимость развиваемой силы от интервала между соседними электрическими стимулами и деформацию стенки ЛЖ в ответ на изменение электрической проводимости.

Были поставлены и решены задачи о работе сердца при различных сценариях [2]: в покое; при физической нагрузке, которую моделировали, увеличивая частоту сердцебиения с 60 до 120 ударов в минуту и одновременно снижая периферическое сопротивление сосудов большого круга в два раза; при атриовентрикулярной блокаде, которую моделировали, пропуская каждое четвертое сокращение желудочков и при верхушечном трансмуральном инфаркте миокарда ЛЖ, который моделировали с помощью ухудшения электрической проводимости в пораженной области.



Геометрия ЛЖ в начале систолы а) в норме и б) при трансмуральном инфаркте с зоной поражения от верхушки ЛЖ до координаты Z_0 . Цветная легенда показывает длины саркомеров.

Результаты, показывают рост давлений и ударного объема ЛЖ в ответ на увеличение частоты электрической стимуляции, частичную компенсацию производительности ЛЖ при атриовентрикулярной блокаде вследствие увеличения сократимости желудочка в сокращении, следующем за пропущенным, а также снижение производительности ЛЖ при верхушечном инфаркте, что согласуется с клиническими наблюдениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-74-00046.

1. Syomin F., Osepyan A., Tsaturyan A. Computationally efficient model of myocardial electromechanics for multiscale simulations // PLoS ONE. 2021. 16(7).

2. Сёмин Ф.А., Хабибуллина А.Р., Цатурян А.К. Численное моделирование работы левого желудочка сердца в системе кровообращения: эффекты изменения частоты сокращений и апикального инфаркта миокарда // Биофизика. 2022. Т. 67 (принята к печати).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОСТНОГО ОРГАНА ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Харин Н.В.¹, Большаков П.В.^{1,2}, Саченков О.А.^{1,2}, Герасимов О.В.¹

¹Казанский федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань
e-mail: nik1314@mail.ru

Актуальной задачей является моделирование напряжённо-деформированного состояния пористых многофазных сред, примером такой среды является костная ткань. При симуляции поведения костной ткани [1] необходимо учесть анизотропные свойства среды, определяемые особенностями различных видов костных органов в зависимости от их функционала, возраста, пола, среды обитания и т.п.; такая задача - актуальна. В случае моделирования адаптационных процессов [2], возникающих в костной ткани при воздействии внешних факторов, необходимо знать первоначальное состояние костного органа, а значит, распределение в теле анизотропных свойств. Для определения ортотропных свойств необходимо проведение натурных экспериментов, такой метод невозможен, так как требует большое количество образцов; более того данный метод требует разрушение костного органа.

На сегодняшний день развитие компьютерной томографии позволяет получать информацию о структуре образца без разрушения, а распространённость компьютерных томографов в клинике развивает область применения методики в задачах биомеханики. Развитие направления компьютерной томографии расширяет область применения метода на микроуровне (микробиология, кристаллография и т.п.) и макроуровне (медицина, машиностроение и т.п.). Пример обрабатываемых результатов показан на рисунке 1.

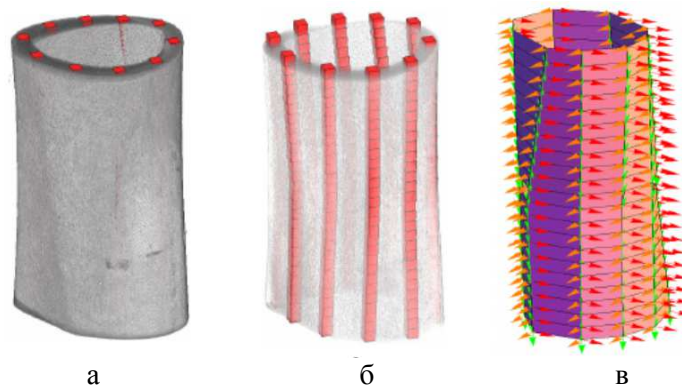


Рис.1. Компьютерная томография костного органа(а), дискретизация на репрезентативные элементы(б) и полученные направления ортотропии (в)

Целью данной работы является создание методики анализа распределения ортотропных свойств костного органа по данным компьютерной томографии.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, грант № 0671-2020-0059.

1. Саченков О.А., Герасимов О.В., Королева Е.В., Мухин Д.А., Яикова В.В., Ахтямов И.Ф., Шакирова Ф.В., Коробейникова Д.А., Хань Х.Ч. Построение негомогенной конечно-элементной модели по данным компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 332-344.

2. Gerasimov O., Yaikova V., Baltina T., Baltin M., Fedyanin A., Zamaliev R., Sachenkov O. Modeling the change in the stiffness parameters of bone tissue under the influence of external loads // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – Vol. 1158. – 022045. DOI:10.1088/1742-6596/1158/2/022045.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРОЙ ФАЗЫ ИНФАРКТА МИОКАРДА

Цгоев Ч.А.

Механико-математический факультет НГУ, Новосибирск

ФИЦ ИВТ, Новосибирск

e-mail: chermentsgoev@yandex.ru

В работе представлены новые математические модели, описывающие сложное динамическое поведение про- и противовоспалительных факторов, а также динамику гибели клеток сердечной мышцы при остром инфаркте миокарда.

Разработана локальная модель воспалительного процесса в центральной зоне инфаркта. Алгоритм решения прямой и обратной коэффициентной задачи опирается на методы типа Рунге-Кутты и генетический алгоритм. В ходе исследования разработана экономичная вычислительная технология структурной и параметрической идентификации уравнений модели. Данная технология основана на идее расщепления обратной коэффициентной задачи с большим количеством неизвестных на последовательность более простых обратных задач. Произведен анализ чувствительности модели к изменению экспериментальных и входных данных. Выполнена диагностическая проверка внутренних связей фазовых переменных. Полученные численные решения согласуются с известными экспериментальными данными [1].

Рассмотрена двумерная нестационарная постановка задачи, где расчетная область представляет собой локальный участок миокарда [2]. Модель качественно и количественно описывает поведение про- и противовоспалительных факторов в центральной зоне повреждения и на ее периферии. Продемонстрировано хорошее согласие с экспериментальными данным. Решение системы обеспечивает локализацию повреждения кардиомиоцитов и биохимического процесса внутри области почти неизменного размера. Изучены различные возможные сценарии распространения воспалительного процесса. Обнаружен триггерный механизм поведения модели: переключения благоприятного сценария острого инфаркта миокарда на сценарий стремительно нарастающего уровня повреждения мышечного слоя сердца.

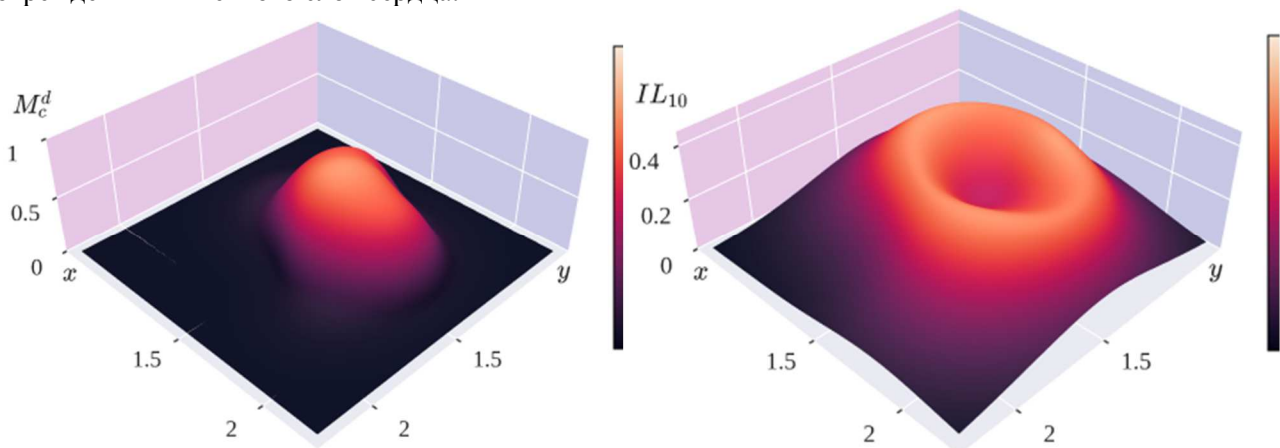


Рис. Обезразмеренный уровень гибели кардиомиоцитов и плотность ИЛ-10 при численном моделировании инфаркта миокарда.

1. Воропаева О. Ф., Цгоев Ч. А. Численная модель динамики факторов воспаления в ядре инфаркта миокарда // Сибирский журнал индустриальной математики. 2019. Т. 22. № 2 (78). С. 13-26.
2. Воропаева О. Ф., Цгоев Ч. А., Шокин Ю.И. Численное моделирование воспалительной фазы инфаркта миокарда // Журнал прикладной механики и технической физики. 2021. Т. 62. № 3 (367). С. 105-117.

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ ФАЗ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ

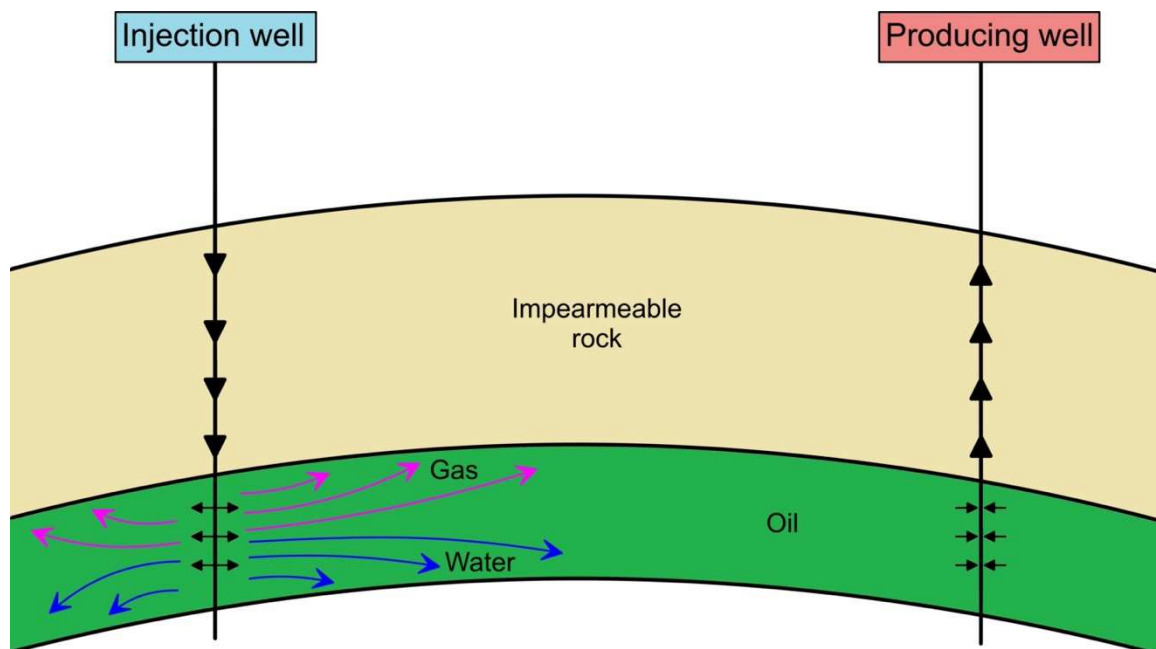
Чернова А.А.^{1,2}

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

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

e-mail: anya_chernova_2504@mail.ru

Исследуется водогазовое воздействие на нефтяные пласты, то есть газовый метод увеличения нефтеотдачи, предполагающий закачку воды и углекислого газа в пласт с целью повышения нефтеотдачи. Применение такого воздействия осложняется возможностью гравитационного расслоения фаз, приводящего к неравномерному охвату пласта вытесняющими агентами. Из системы уравнений, описывающей течение воды и двухфазной углеводородной смеси, определены безразмерные параметры, характеризующие стратификацию фаз. Показано, что эффективность водогазового воздействия зависит от трех параметров подобия [1]. Проведено параметрическое исследование оптимальных стратегий закачки воды и углекислого газа при изменении критериев подобия. Построена диаграмма оптимальных стратегий водогазового воздействия. Исследованы оптимальные интервалы перфорирования нагнетательной и добывающей скважин для различных значений предложенного параметра.



Исследования выполнены при поддержке РНФ (№ 19-71-10051).

1. Чернова А.А., Афанасьев А.А. Влияние гравитационного расслоения фаз на оптимальные режимы водогазового воздействия на нефтяные пласты // Изв. РАН. МЖГ. 2022. (В печати).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМАГНИТНОЙ КОНВЕКЦИИ В МАГНИТНОМ КОЛЛОИДЕ

Чернышов А.В.

Физико-технический факультет СКФУ, Ставрополь

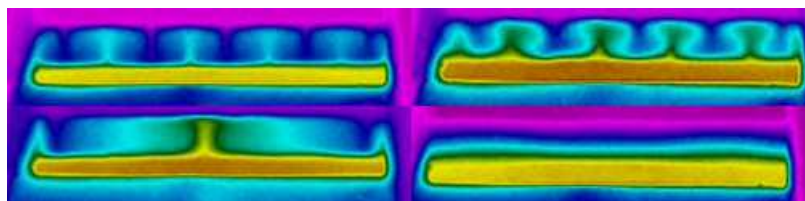
e-mail: andreyrwm@gmail.com

Целью данного исследования является изучение процесса возникновения конвекции при различных режимах нагрева, а также зависимость развития конвективных течений в магнитной жидкости при воздействии магнитного поля, приложенного перпендикулярно тепловому потоку.

Экспериментальная установка представляла собой прямоугольную кювету, выполненную из оргстекла, нижняя и верхняя границы кюветы представляют из себя алюминиевые пластины. Передняя часть кюветы была сделана из пластиковой пленки, прозрачной для ИК диапазона. После чего кювета помещалась в электромагнит, нижняя пластина нагревалась при помощи керамических резисторов, а также теплоизолировалась, верхняя же пластина термостатировалась, на нее были укреплены массивные радиаторы, которые обдувались при помощи вентилятора. Все измерения записывались на тепловизор FLIR E40.

В данной работе экспериментально исследовалось явление терромагнитной конвекции в плоском квазидвумерном прямоугольном слое магнитной наножидкости, подогреваемого снизу. Внешнее магнитное поле было ориентированно перпендикулярно тепловому потоку, а плоскость слоя магнитной жидкости лежала вдоль линий магнитной индукции поля. Был исследован характер теплопереноса в магнитной жидкости на основе керосина в зависимости от величины магнитного поля, а также при различных режимах нагрева. Кроме того, исследовался магнитный коллоид, дисперсионной средой которого является вода.

Было показано, что критическое число Рэлея, при котором возникает неустойчивость горизонтального граничного слоя, зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Причем, при ориентации внешнего магнитного поля перпендикулярно тепловому потоку критическое число Рэлея возрастает.



Характер конвективных течений: сверху слева – естественная конвекция жидкости на основе керосина, слева снизу – терромагнитная конвекция жидкости на основе керосина, сверху справа – естественная конвекция жидкости на основе воды, справа снизу – терромагнитная конвекция жидкости на основе воды.

Экспериментально обнаружено, что теплообмен за счет процесса тепловой конвекции в поперечном тепловому потоку магнитном поле уменьшается, а течение тепловых потоков стабилизируется по сравнению с естественной конвекцией и происходит уширение ячеек Бенара для магнитной жидкости на основе керосина.

Исследован теплообмен магнитной жидкости на воде в магнитном поле различной величины. Установлено, что магнитное поле также подавляет процесс тепловой конвекции, при малых значениях магнитного поля конвективные ячейки увеличиваются в ширине, а при больших значениях поля конвекция вовсе не возникает, и теплоперенос идет за счет теплопроводности.

1. Zakinyan, A.; Kunikin, S.; Chernyshov, A.; Aitov, V. Magnetic Field Inhibition of Convective Heat Transfer in Magnetic Nanofluid. *Magnetochemistry* 2021, 7, 21.

О СТАБИЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ И ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК

Чулюнин А.Ю.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: chulyu-n@mail.ru

Проблема взаимодействия потоков вязкой несжимаемой жидкости с рельефами различной конфигурации была и остается важной проблемой современной механики. Известно, что луночные углубления являются хорошими интенсификаторами теплообмена, не вызывающими, при этом существенного роста гидравлического сопротивления [1]. На практике это свойство применяется при разработке теплообменных устройств макро- и микро-масштабов. Кроме того, в ряде работ показано, что нанесение луночных углублений на гладкие поверхности позволяет снизить значение коэффициента сопротивления тела [2]. В последнее время все больше работ посвящено исследованию характеристик овално-траншейных лунок (ОТЛ). В частности, в [3] показано, что суммарная теплоотдача от участка с длинной овалной траншеей более чем в три раза превышает теплоотдачу от участка со сферической лункой с одинаковой площадью пятна.

В работе в рамках URANS и IDDES подходов к численному моделированию турбулентных течений рассматривается обтекание вязкой несжимаемой жидкостью овално-траншейной лунки, расположенной на нижней стенке канала прямоугольного поперечного сечения. ОТЛ расположена симметрично по отношению к боковым стенкам канала и представляет собой две половинки полусферической лунки радиуса R , соединенных между собой полуцилиндрической вставкой, длина которой выбирается равной R . Число Рейнольдса на входе в канал $Re = 4 \cdot 10^4$.

В рамках серии вычислительных экспериментов получено, что при переходе от сферической лунки к овално-траншейной с удлинением $L=R$ происходит стабилизация течения, при этом возможны два устойчивых квазиустановившихся состояния с ярко выраженными наклонными одноядерными вихревыми структурами, начинающимися на внутренних стенках концевых сферических скруглений траншеи и выходящих во внешнюю пристеночную область течения в районе противоположных концов траншеи (рис.1). Конкретный вид установившегося течения зависит от предыстории установления, в частности – от начальных условий задачи.

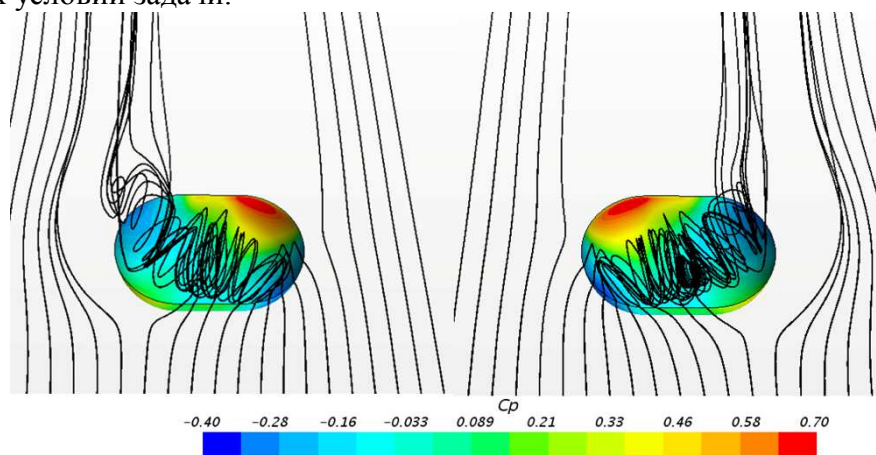


Рис.1 Режимы обтекания короткой овално-траншейной лунки.

1. Chen Y., Chew Y.T., Khoo B.C. Enhancement of heat transfer in turbulent channel flow over dimpled surface // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 8100–8121.
2. van Nesselrooij M., Veldhuis L.L.M, van Oudheusden B.W., Schrijer F.F.J. Drag reduction by means of dimpled surfaces in turbulent boundary layers // Exp. Fluids. 2016. V.57. P.142.
3. S. A. Isaev, A. Y. Chulyunin, D. V. Nikushchenko et al. Analysis of the anomalous intensification of a separate flow and heat transfer in a stabilized section of a narrow channel with single-row, inclined, oval-trench dimples with the use of various grids and turbulence models // High Temperature. – 2021. – Vol. 59, no. 1. – P. 106–114.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯГА ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАПЫЛЕНИИ ПОСАДОЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАЗЦА И КОНТРТЕЛА

Чурикова А.В., Носов Ю.О., Розов С.Г.

ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: alena_churikova95@mail.ru

В работе [1] приведены аналитические решения влияния натяга на величины контактных напряжений в подшипниках качения и обозначена проблема величины предельного натяга. При проведении натурных испытаний стандартного натяга недостаточно для фиксации контртела на валу. Задача численного моделирования контактного взаимодействия образца-шара и контртела напесованного на вал с учетом влияния натяга и температур рассмотрена в работе [2].

При проведении длительных усталостных испытаний, монтаже и демонтаже контртела посадочная поверхность вала подвержена износу. В целях экономической целесообразности для восстановления поверхности вала применяется лазерная наплавка порошком H13, толщиной от 0,3 мм до 0,7 мм. Наплавленный материал имеет пористую структуру, отличные от материала вала твердость и тепловой линейный коэффициент расширения. Для определения величины натяга контртела на вал и его влияния на контактные напряжения в зависимости от различных температур, построена геометрическая модель. Рис. 1, проведена дискретизация системы, на основе которой выбрано оптимальное конечно-элементное разбиение конструкции [3].

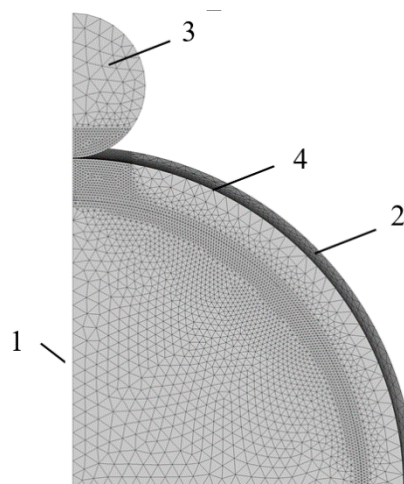


Рис. 1. Конечно-элементная модель 1 – вал; 2 – контртело; 3 – образец; 4 – слой напыления.

Реализовано численное моделирование НДС контртела и вала при различных натягах, толщине наплавленного слоя в диапазоне контактных напряжений 2000-4000 МПа и температур 20-100 °С. Проведена оценка влияния возникающего растягивающего напряжения, при контактом взаимодействии образца и контртела. По результатам работ выбран оптимальный натяг, обеспечивающий длительность усталостных испытаний при контактом взаимодействии образца-шара и контртела.

1. Беломытцев О.М. О влиянии натяга и контактных напряжений от натяга на проскальзывание в цилиндрических роликоподшипниках в опорах газотурбинных двигателей / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева. 2009. № 3(19), ч. 3. С. 171-177.

2. Чурикова А.В., Носов Ю.О., Розов С.Г. Численное моделирование влияния натяга на контактные напряжения при взаимодействии образца и контртела в условиях повышенных температур // Материалы XXII Всероссийской научнотехнической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2021». 2021. Том 2. С. 229-232.

3. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Nosov Yu. O. Analysis of deformation behavior of the anti-friction layer part with a spherical recess for lubricant // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2371, Art. 020005. <https://doi.org/10.1063/5.0059621>.

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ АЭРОЗОЛЯ РАЗНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СЕЧЕНИЕМ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА

Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А.

Институт механики и машиностроения – обособленное структурное
подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань
e-mail: liqn@mail.ru

Изучение волновой динамики неоднородных и многофазных сред представляет значительный интерес в связи с прикладной направленностью таких исследований [1-3]. Установлено, что при разной начальной концентрации аэрозоля для всех рассматриваемых длин однородных труб и частот возбуждения время осаждения различно [4]. В связи с этим представляет интерес исследование осаждения аэрозоля при различных его начальных концентрациях в трубе с изменяющимся сечением.

Экспериментальные исследования проводились на установке, где основным элементом был виброгенератор, который приводил в движение плоский поршень радиуса $R_1 = 0.05$ м [5]. Колебания возбуждались в цилиндре высотой $L_1 = 0.038$ м. Цилиндр соединялся со стеклянной трубой длиной $L_0 = 1.06$ м и радиусом $R_0 = 0.018$ м. В качестве рабочей среды использовался аэрозоль DEHS с диаметром капель около 1 мкм.

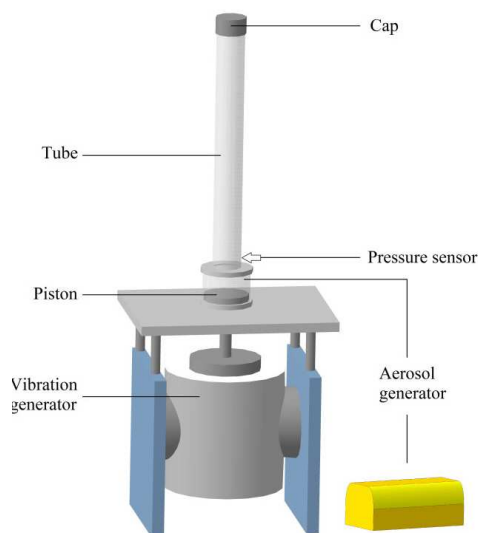


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки.

Получены осциллограммы колебаний давления газа вблизи резонанса при различных амплитудах возбуждения. Интенсивность колебаний максимальна в чистом газе и падает с увеличением концентрации аэрозоля. Выявлено, что с уменьшением концентрации аэрозоля осаждение происходит быстрее.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00302).

1. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 263 с.
2. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Волновая динамика газовзвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях (обзор) // ТВТ. 2021. Т. 59. №. 3. С. 443-466.
3. Вараксин А. Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646–669.
4. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Ткаченко Л.А. Экспериментальное исследование коагуляции аэрозоля в трубе вблизи субгармонического резонанса // ТВТ. 2004. Т. 42. № 5. С. 788.
5. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Экспериментальное исследование осаждения аэрозоля в закрытой трубе с изменяющимся сечением // ТВТ. 2022. Т. 60. №. 1. С. 443-466.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СМЕНЫ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ДЕБИТОМ СКВАЖИНЫ И ПЕРЕПАДОМ ДАВЛЕНИЯ В ТРЕЩИНЕ ГРП

Башмаков Р.А.^{1,2}, Шамматова А.А.^{1,3}

¹ИМех УФИЦ РАН, Уфа

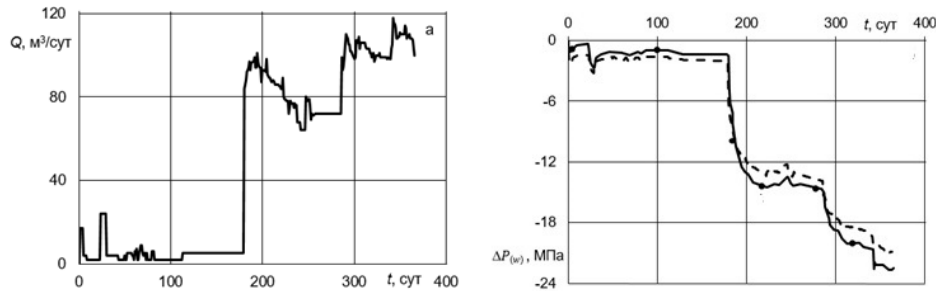
²БашГУ, Уфа

³УГНТУ, Уфа

e-mail: bashmakov_rustem@mail.ru, Stasya_7@mail.ru

В работе рассматривается применение метода последовательной смены стационарных состояний, предложенного Чарным И.А. к задаче о распределении давления жидкости в вертикальной трещине, полученной путем гидроразрыва пласта. Изучается связь между давлением на скважине и дебитом при различных режимах работы скважины. Результаты работы позволяют по данным о работе скважины анализировать коллекторские характеристики пласта и трещины, определять параметры трещины.

Пусть в момент времени $\tau_0 = 0$ начинается работа скважины и давление на скважине, приняв значение $P_{(w)0}$, поддерживается постоянным. С момента времени τ_1 до момента времени τ_2 давление на скважине равно $P_{(w)1}$ и т.д. (ступенчатое изменение давления на скважине). Основываясь на результатах работы [1], решение, полученное методом ПССС, описывающее изменение давления в трещине может быть записано в виде $P_f = H(t)P_{(w)0} \exp(-2^{1/4} z_0) + \sum_{i=1}^n H(t-\tau_i)(P_{(w)i} - P_{(w)i-1}) \exp(-2^{1/4} z_i)$, $z_i = \sqrt{\chi/2} x (t-\tau_i)^{-1/4}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, $H(t)$ – функция Хевисайда. Нижние индексы f, p при переменных означают, что рассматриваются значения, относящиеся к трещине, пласту, соответственно, а индекс 0 означает начальное значение.



Также мы можем получить значения давления в трещине и на забое скважины P_f и $P_{f(w)}$ в случае, когда дебит принимает постоянные значения $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ в промежутках времени $[\tau_0, \tau_1), [\tau_1, \tau_2), \dots, [\tau_n, \infty)$:

$$P_f = \frac{-\mu}{2^{1/4} d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \left(q_0 H(t-\tau_0)(t-\tau_0)^{1/4} \exp\left(-x\sqrt{\chi/2}(t-\tau_0)\right) + \sum_{i=1}^n H(t-\tau_i)(q_i - q_{i-1})(t-\tau_i)^{1/4} \exp\left(-x\sqrt{\chi/2}(t-\tau_i)\right) \right)$$

$$P_{f(w)} = \frac{-\mu}{2^{1/4} d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \left((t-\tau_0)^{1/4} q_0 H(t-\tau_0) + \sum_{i=1}^n (t-\tau_i)^{1/4} H(t-\tau_i)(q_i - q_{i-1}) \right), \quad \chi = \frac{2}{d_f} \frac{m_p}{m_f} \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\alpha_f}.$$

На рисунке показано сравнение промысловых (сплошная линия) и теоретических (пунктир) кривых перепада давления на скважине.

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

1. Шагапов В.Ш., Башмаков Р.А., Фокеева Н.О. Особенности фильтрации флюидов в коллекторах, подверженных гидроразрыву пласта, при переходных режимах работы скважины// Прикладная механика и техническая физика 2022. №3. С. 117-127.

2. Шамматова А.А. Описание переходных режимов работы скважины при наличии трещины ГРП методом ПССС / Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям м г. Новосибирск, Россия, 25–29 октября 2021 г. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2021. – С. 37-38.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭМБОЛИЗАЦИИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ

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

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

e-mail: tatiana_06.08@mail.ru

Церебральная артериовенозная мальформация (АВМ) является врожденной патологией развития сосудов головного мозга, при которой артериальное и венозное кровеносные русла соединены клубком беспорядочно переплетенных выродившихся сосудов. Одним из методов хирургического лечения данных патологий является эмболизация – это малоинвазивное вмешательство, представляющее собой внутрисосудистое заполнение клубка патологических сосудов специальным жидким твердеющим веществом (эмболическим агентом) с целью блокирования кровотока через них. Данный способ лечения широко применяется, но до сих пор в некоторых случаях сопровождается интраоперационным разрывом сосудов патологии. В работе математическое моделирование процесса эмболизации рассматривается совместно с постановкой задачи оптимального управления указанным процессом.

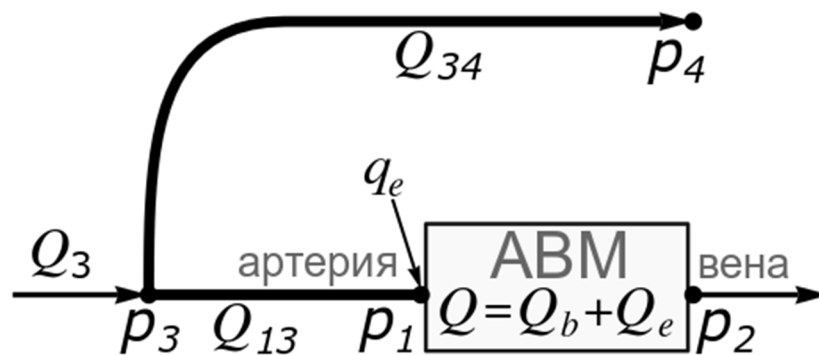


Рис. Модель эмболизации АВМ, учитывающая перераспределение потока крови в окружающую сосудистую систему.

В данной работе для описания процесса эмболизации предлагается комбинированная модель, в которой наряду с совместным течением крови и эмболического агента внутри патологии учитывается перераспределение крови в окружающие здоровые сосуды. Процесс эмболизации моделируется как процесс двухфазной фильтрации несмешивающихся несжимаемых жидкостей, где вытесняемой фазой является кровь, а вытесняющей эмболический агент. Поток крови, поступающий в АВМ, меняется во время операции за счет перераспределения крови в соседние здоровые сосуды, в модели этот эффект учитывается путем введения дополнительных соотношений. Полученная система уравнений решается численно с помощью монотонной модификации схемы CABARET [1].

Основная цель работы заключается в отыскании оптимального с точки зрения безопасности и эффективности сценария эмболизации артериовенозной мальформации. Поставлена задача оптимального управления, где целевой функционал и ограничения выбираются в соответствии с медицинскими показаниями. Управлением является зависящая от времени функция, определяющая объемный расход эмболического агента вещества на артериальном входе патологии. Задача оптимизации решается численно в специальном классе управлений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00264).

1. Cherevko A.A., Gologush T.S., Petrenko I.A., Ostapenko V.V., Panarin, V.A. Modelling of the arteriovenous malformation embolization optimal scenario //Royal Soc. Open Sci. 2020. Vol. 7. №. 7. P. 191992.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ГАЗО-ВИХРЕВОМ БИОРЕАКТОРЕ

Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Скрипкин С.Г.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: sharifullinbulat@mail.ru

Исследование формирования циркуляционных вихревых ячеек для улучшения тепло-массообменных процессов в биологических и энергетических технологиях является важнейшим практическим приложением в разработке вихревых аппаратов и оптимизации рабочих режимов. Одним из таких аппаратов является вихревой биореактор [1].

В данной работе выполнено экспериментальное исследование распределения скорости при организации вихревого движения на эксплуатационных режимах работы в промышленном стеклянном биореакторе объемом 10 литров с диаметром реакторной емкости $D=190$ мм (рис. 1(б)). Вихревое движение воздуха генерируется активатором с частотой вращения Ω до 2700 об/мин. В качестве модельной среды использовался 65% водный раствор глицерина ($\rho = 1150$ кг/м³, $\nu = 15$ мм²/с). Для наблюдения картины вихревого движения применялись методы цифровой трассерной визуализации (PIV) и адаптивной трековой визуализации.

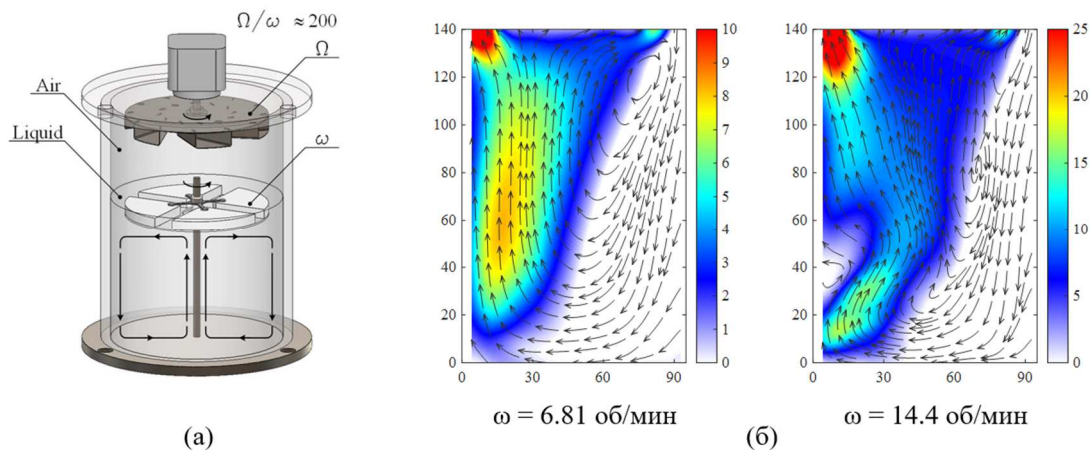


Рис. 1. Схема экспериментального стенда (а) и векторное поле скорости при $\omega = 6.81$ и 14.4 об/мин (б).

В ходе экспериментальной работы исследовалась конфигурация газо-вихревого биореактора с шайбой, плавающей на поверхности модельной жидкости. Соотношение частот вращения активатора и плавающей шайбы Ω/ω составляло ≈ 200 . В такой конфигурации газовый вихрь закручивает плавающую шайбу, которая в свою очередь приводит в движение рабочую жидкость. Получено, что наличие плавающей шайбы обеспечивает интенсификацию перемешивания жидкости за счёт высокой скорости вращения шайбы.

Показано, что при вращении активатора под шайбой возникают ячейки центробежной циркуляции, которые при увеличении частоты вращения активатора расширяются в глубь реактора. На рисунке представлены поля скорости в жидкости. Для удобства на рис. 1(б) приведены половины скалярных полей скорости в жидкости, где левый край изображения соответствует оси реакторной емкости, а правый край – периферии. Установлено, что наблюдаемая вихревая структура и ее динамика при увеличении закрутки потока совпадает со структурой замкнутого вихревого потока в цилиндрическом контейнере как для одножидкостных, так и двухжидкостных системах [2, 3].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00083.

1. Savelyeva A. V. et al. Analysis of the efficiency of recombinant Escherichia coli strain cultivation in a gas - vortex bioreactor // Biotechnology and Applied Biochemistry, 2017, Vol. 64(5), P. 712-718.

2. Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В. Передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей // Теплофизика и аэромеханика, 2021, Т. 28, № 1, С. 67-78.

3. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32(6). P.061706.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ТОРМОЗОВ

Шкалей И.В., Буковский П.О.

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

e-mail: ioann_shiva@list.ru

В работе изучались два типа образцов из углерод-углеродного фрикционного материала (УУКМ). Образцы первого типа были изготовлены на основе серийного отечественного УУКМ марки «Термар-АДФ» на основе дискретного графитированного волокна длиной 40 мм в готовом материале. Образцы второго типа были изготовлены из углеродного материала производства КНР. Этот материал был изготовлен из квазитрехмерной игольчатой заготовки из карбонизованного углеродного волокна на основе полиакрилонитрила, которая была изготовлена из чередования направления укладки углеродной ленты (под 90°) и рубленого войлока, с последующим иглопробиванием слоев [1]. Преимуществом второго материала заключается в том, что тепло от фрикционного разогрева не аккумулируется на поверхности трения, а равномерно распределяется по всему объему композита. Образцы были изготовлены в виде колец с диаметром 28 мм внешним, 20 мм внутренним и высотой 15 мм из авиационного тормозного диска.

Экспериментальное исследование трибологических характеристик проводилось на лабораторном трибометре UMT-2 по схеме контакта «кольцо-кольцо» с вариацией контактных давлений P от 0,5 до 1 МПа и скоростей скольжения V от 1 до 4 м/с. Данные нагрузочно-скоростных режимов были взяты из имеющихся методик проведения модельных испытаний углеродных композитов тормозных дисков [2]. Во время проведения экспериментов происходил фрикционный разогрев пары трения, при максимальных P и V температура в контакте достигала отметки в 1200°C . При достижении температуры в зоне контакте равной 400°C углерод начинает активно взаимодействовать с кислородом, вызывая его горение, которое сильно искажает показатели износа. Во избежание горения образцов все эксперимента были проведены в среде инертного газа.

На рис. 1 изображены зависимости коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) от мощности трения, PV для отечественного (1) и зарубежного (2) композитов.

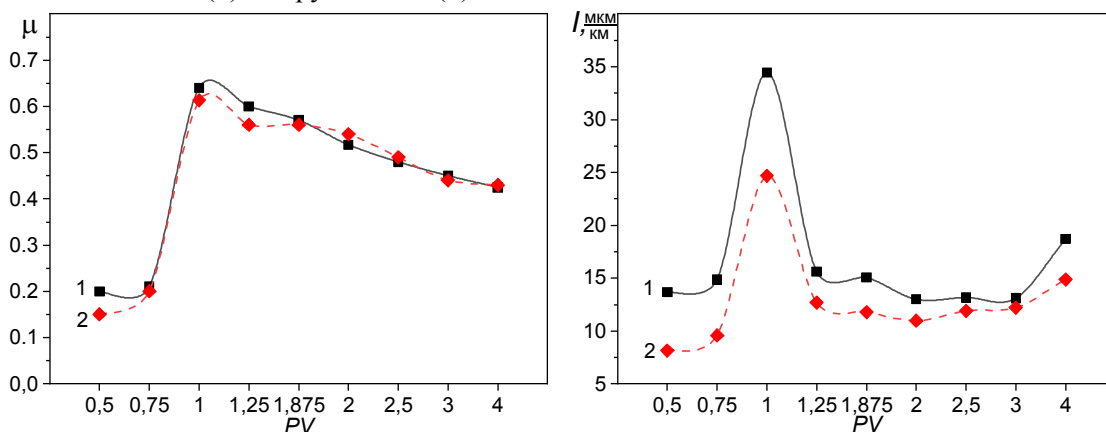


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) от мощности трения, где 1 – отечественный композит, 2 – зарубежный композит.

Для исследуемых композитов наблюдается пик интенсивности изнашивания при $PV = 1$, обусловленный сухим трением вследствие испарения влаги из пор композита. Из рис. 1,б видно, что дополнительное пробивание УУКМ перпендикулярными нитями увеличивают износостойкость самого материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-19-00548-П).

1. Wu S., Yi M., Ge Y., Ran L., Peng K. Effect of carbon fiber reinforcement on the tribological performance and behavior of aircraft carbon brake discs // Carbon. 2017. Vol. 117. P. 279-292.

2. Чичинадзе А.В., Албагачиев А.Ю., Кожемякина В.Д., Коконин С.С., Суворов А.В., Кулаков В.В. Оценка фрикционно-износных характеристик отечественных углеродных фрикционных композиционных материалов для нагруженных тормозов самолетов // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С.359-371.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-3 ПРИ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Юрина А.Д.¹, Банников М.В.^{1,2}, Трефилов И.А.¹, Попов Е.С.¹

¹Физический факультет ПГНИУ, Пермь

²ИМСС УрОРАН, Пермь

e-mail: sandrayur@icloud.com

Важным вопросом в области механики является изучение усталости металлов. Усталость – это процесс разрушения, происходящий в металлах, которые подвержены переменному напряжению, и представляющий собой накопление повреждений [1]. Этот процесс представляет собой следствие зарождения трещин [2].

Для изучения усталостной долговечности и механизмов инициирования трещины в режиме гигациклового усталости изготавливались образцы цилиндрической формы с переменным сечением, с минимальным сечением в центре (Рисунок 1а).

На поверхности излома образца (Рисунок 1б) наблюдается классический вид внутреннего разрушения «Fish-eye». В центре находится темное пятно – очаг зарождения усталостной трещины, который называют «Optical dark area» или «Fine granular area». Поверхность в этой области имеет очень шероховатую структуру из-за длительного накопления повреждений, которые впоследствии формируют трещину. Светлая зона вокруг очага – область медленного роста трещины.

Для исследования масштабно-инвариантных закономерностей из двумерного профиля поверхности разрушения с помощью интерферометра-профилометра New View 5010 вырезались одномерные профили (Рисунок 1в). Далее профили анализировались в терминах показателя Херста.

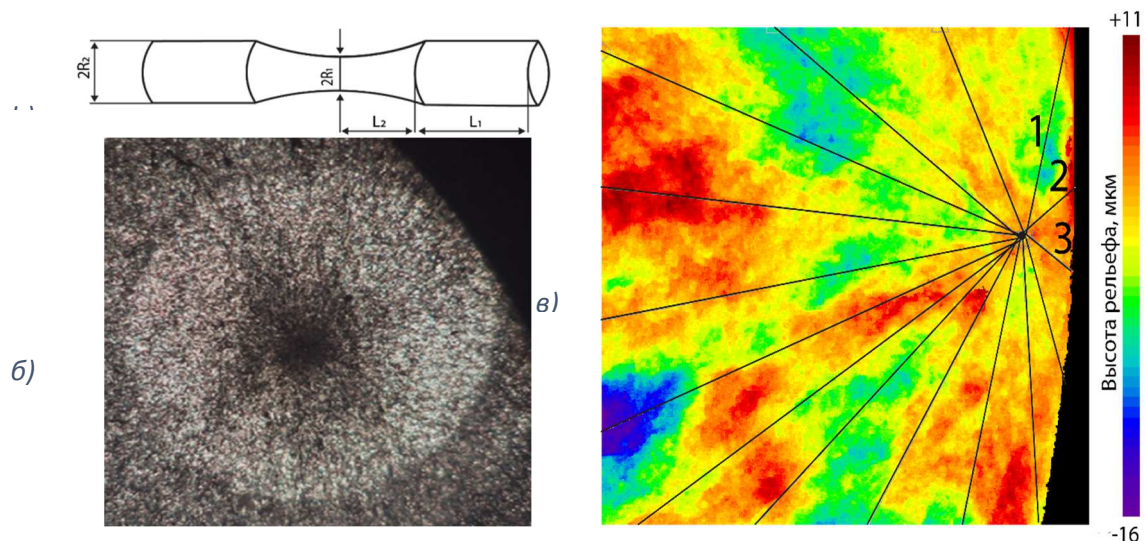


Рисунок 1. а) геометрия образца, б) поверхность разрушения образца, в) процесс получения профилей.

Анализ значений показателя Херста позволяет сделать вывод о том, что механизмы формирования морфологии поверхности разрушения в областях очага трещины и её распространения различны. Внутри очага морфология показывает признаки хаотичного формирования структур, что говорит о наличии множества путей для развития профилей.

Также по полученным данным сделан следующий вывод: уменьшение показателя Херста с ростом увеличения изображения вызвано тем, что с повышением разрешения картинки обнаруживаются такие элементы рельефа, которые были образованы другими механизмами на данном масштабном уровне.

1. Банников М. В. и др. Нелинейная динамика и стадийность поврежденности титановых сплавов Ti6Al4V и Ti45Nb при сверхмногоциклового усталости //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – №. 2. – С. 56.

2. Jiang R., Song Y. D., Reed P. A. Fatigue crack growth mechanisms in powder metallurgy Ni-based superalloys–A review //International Journal of Fatigue. – 2020. – Т. 141. – С. 105887.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВА 36Н

Юсупова Н.Р., Крылова К.А., Мулюков Р.Р.
Институт проблем сверхпластичности металлов, Уфа
e-mail: yusupovanelli1@gmail.com

Сплавы системы Fe-Ni нашли широкое применение в современной технике и приборостроении. Одним из наиболее распространенных железо-никелевых соединений является инварный сплав 36Н (ГОСТ 10994-74) [1], обладающий аномально низким значением теплового коэффициента линейного расширения (ТКЛР) $\alpha \approx 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур от 20 до 100 $^\circ\text{C}$ [2]. Однако при своих уникальных свойствах Fe-Ni сплавы имеют значительный недостаток, ограничивающий их применение, - они обладают низкой прочностью и твердостью. К примеру предел прочности на растяжение у сплава 36Н меньше 500 МПа. Эффективным методом повышения прочностных свойств сплавов является деформационное наноструктурирование (НС) кручением под высоким давлением (КВД). К тому же в работах [3, 4] показано, что у наноструктурного сплава 36Н величина ТКЛР почти в 2 раза ниже, чем в крупнокристаллическом инваре.

Методом КВД были получены наноструктурные образцы сплава 36Н со средним размером фрагментов около 100 нм. Для получения различных структурных состояний образцы после деформации подвергались отжигу в вакууме при температурах от 100 до 500 $^\circ\text{C}$ в течении 60 минут. Полученные образцы сплава в разном структурном состоянии подвергались дальнейшему исследованию на микроструктуру, микротвердость и прочность.

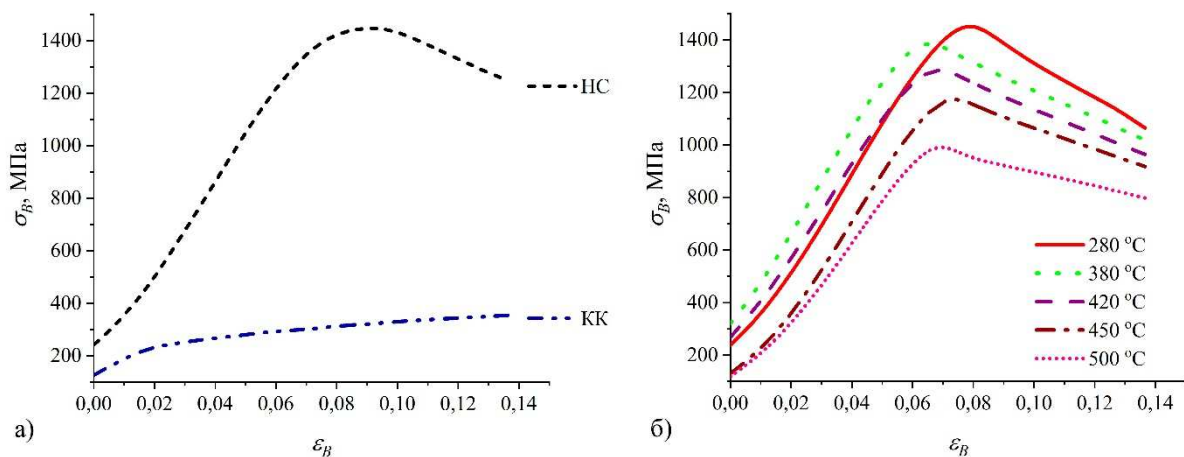


Рис. 1. Кривые напряжение-деформация сплава 36Н а) в НС и КК состоянии б) в разном структурном состоянии.

В работе показано, что формирование НС в сплаве 36Н методом КВД приводит к тому, что микротвердость и предел прочности сплава 36Н возрастает в 3 и 3,5 раза соответственно по сравнению с крупнокристаллическим состоянием. Последующие отжики в интервале температур от 280 до 500 $^\circ\text{C}$ привели к росту среднего размера зерна, что оказывает влияние и на прочностные свойства сплава.

Работа выполнена в рамках государственного задания молодежной лаборатории ИПСМ РАН.

1. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки.
2. A. Sahoo, V. R. R. Medicherla. Fe-Ni Invar alloys: A review // Materials Today: Proceedings. 2021 T. 43 № 2. С. 2242-2244.
3. К. А. Крылова, И. Х. Биткулов и Р. Р. Мулюков Effect of nanostructuring on the thermal expansion and saturation magnetization of Fe - 36% Ni and Fe - 50% Ni alloys // IOP Publishing 2020 г. T. 1008 C. 012022.
4. N. R. Yusupova, K. A. Krylova, R. R. Mulyukov Thermal analysis and microhardness of nanostructured alloy Invar 36 // Letters on Materials 2021 11 № 4, С. 382-385.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВЯЗКОУПРУГИМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ ДВУХУРОВНЕВОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ШТАМПОВ

Яковенко А.А.^{1,2}, Горячева И.Г.¹

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва
e-mail: anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Идеальная гладкость поверхностей тел, предполагаемая во многих контактных задачах, явление редкое. В действительности же поверхности тел обладают некоторым микрорельефом, который носит либо статистический, либо регулярный характер. Для исследования контакта поверхностей с нерегулярным рельефом широко распространена статистическая модель Гринвуда-Вильямсона [1], которая описывает все неровности сферами одинакового радиуса, расположенных на различной высоте. В этом случае высотное распределение неровностей учитывается за счет выбора определенной функции распределения. В случае контакта поверхностей с регулярным рельефом, для решения контактных задач разработан метод локализации [2], который позволяет исследовать периодический контакт с упругим полупространством разноуровневой системы осесимметричных штампов. В данной работе метод локализации расширен на случай вязкоупругого полупространства.

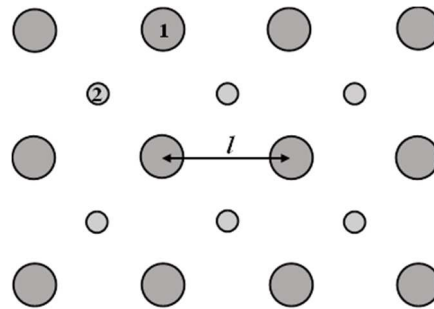


Рис.1 Схема двухуровневой периодической системы штампов (квадратная решетка).

Для исследования была выбрана двухуровневая система штампов с заданной разницей высот h . На каждом уровне штампы расположены в узлах квадратной решетки с шагом l (рис.1). К системе приложено постоянное номинальное давление, под действием которого система внедряется на некоторую глубину в вязкоупругое полупространство. Вследствие ползучести материала полупространства глубина внедрения со временем увеличивается, и даже если в начальный момент штампы второго уровня не контактировали с полупространством, они могут вступить в контакт спустя некоторое время. С использованием полученного ранее решения для одноуровневой системы штампов [3], для рассматриваемой задачи определен момент вступления в контакт с полупространством штампов второго уровня в зависимости от механических свойств вязкоупругого полупространства, формы штампов и их пространственного расположения в системе. И для одноуровневого, и для двухуровневого контакта исследовано изменение со временем размеров пятен контакта с полупространством штампов каждого уровня и фактической площади контакта, а также влияние на эти зависимости геометрии периодической системы.

Все полученные результаты также сравнивались с упрощенной моделью, не учитывающей взаимное влияние пятен контакта. Показано, что пренебрежение взаимным влиянием, как это делается обычно в статистических моделях, может приводить к существенным ошибкам в определении фактической области контакта шероховатых тел.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90038.

1. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proc. Math. Phys. Eng. Sci. 1966. V. 295. № 1442. P. 300-319.

2. Горячева И.Г. Периодическая контактная задача для упругого полупространства // ПММ. 1998. Т. 62. № 6. С. 1036-1044.

3. Yakovenko A., Goryacheva I. The Periodic Contact Problem for Spherical Indenters and Viscoelastic Half-Space // Tribology International. 2021. V.161. 107078.

Научное издание

***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ-МЕХАНИКОВ***

4 – 14 сентября, 2022 г.; Сочи, "Буревестник" МГУ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Электронное издание сетевого распространения

Публикуется в авторской редакции

Макет утвержден 26.08.2022

Формат 60х84 1/8
Усл. печ. л. 21.75

Издание № 12205

Издательство Московского университета

119191, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

(ул. Академика Хохлова, д. 11)

<http://youngmech.ru/images/conference/files/Thesis2022.pdf>